

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN

SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

EEN KATHODESTRAALBUIS MET NAVERSNELLING

door J. de GIER.

621.317.755 : 621.317.087

Om bij een kathodestraalbuis een groote schrijfsnelheid te verkrijgen, is het gewenscht, de versnellende spanning voor de electronen zoo hoog mogelijk op te voeren. Bij de gebruikelijke constructies is men hierin begrensd, doordat met de spanning de afmetingen van de buis zouden moeten toenemen en de deflectiegevoeligheid zou afnemen. Deze bezwaren worden sterk verminderd, wanneer men naversnelling toepast, dwz. de electronen na het passeeren van de afbuigplaten met behulp van een extra-electrode opnieuw versnelt. Hierdoor kan een aanzienlijk hogere schrijfsnelheid worden verkregen, zonder dat derhalve de afmetingen van de buis grooter behoeven te worden, terwijl ook de gevoeligheid niet in zoo sterke mate achteruit gaat als wanneer de electronen reeds op hun eindsnelheid zijn gebracht vóór het passeeren van het afbuigende systeem. In dit artikel wordt de naversnellingsbuis DN 9-5 beschreven, welke uit de kathodestraalbuis DN 9-3 is ontwikkeld. De naversnellingsselectrode kan op een spanning van 5000 V ten opzichte van de kathode worden gebracht. Hierbij wordt een maximale schrijfsnelheid van 24 km/sec verkregen. Uitvoerig wordt in het artikel ingegaan op de wijze, waarop de naversnellingsselectrode invloed uitoefent op de deflectiegevoeligheid van de kathodestraalbuis en op de bestrijding van de vervormingen, welke door de naversnellingsselectrode worden veroorzaakt.

Een zeer belangrijke grootheid om de prestaties van een kathodestraalbuis te kenmerken, is de maximale schrijfsnelheid, dwz. de snelheid, waarmee bij een slechts éénmaal optredend verschijnsel het lichtende vlekje op het scherm van de kathodestraalbuis mag loopen, om nog juist zichtbaar te zijn resp. fotografisch te kunnen worden vastgelegd. In een vroeger artikel in dit tijdschrift¹⁾ werd besproken, welke elektrische buiseigenschappen en welke factoren van het fotografische procédé de maximale schrijfsnelheid bepalen. Wat de elektrische buiseigenschappen betreft, moet men ter verkrijging van een hooge schrijfsnelheid zorgen voor een groote straalstroom, een kleine vlekdiаметer en een groote snelheid van de electronen, die op het fluoresceerende scherm treffen. Bij de fotografische methode komt het verder vooral aan op een groote relatieve opening van het fotografische objectief en op een zoo sterk mogelijke verkleining bij het fotografeeren.

Ter illustratie van de schrijfsnelheden, die met gangbare typen van kathodestraalbuizen verkregen kunnen worden, diene een onderzoek, dat uitgevoerd werd aan de kathodestraalbuis DN 9-3 (een buis met een schermdiameter van 9 cm, welke in de kathodestraaloscillograaf GM 3152 wordt toegepast). De versnellende spanning bedroeg hierbij 1000 V, de stroomsterkte in de bundel 20 μ A. Het oscillogram werd in een verhouding 1:4 verkleind opgenomen, terwijl een lens met een opening 1:3,2 werd gebruikt, zooals deze bij vele van de hedendaagsche miniatuurcamera's ter beschikking staat. De gebruikte filmsoort was Agfa Isopan. Als resultaat bleek, dat de grootste schrijfsnelheid, waarbij op de film nog een goed zichtbare zwarting ontstaat, 850 m/sec bedraagt. Dit beteekent, dat een verschijnsel met een duur van 10^{-5} sec door een lijn van 8,5 mm booglengte kan worden weergegeven. Bij vele technische toepassingen zal men hiermee kunnen volstaan, doch voor het onderzoek van doorslagverschijnselen, stootgolven, enz., waarbij processen met een tijdsduur van 10^{-6} of 10^{-7} sec een rol kunnen spelen, zijn aanmerkelijk hogere schrijfsnelheden vereischt.

Het ligt voor de hand om te trachten de schrijfsnel-

¹⁾ J. F. H. Custers: Het registreeren van snel verlopende elektrische verschijnselen met kathodestraalbuis en camera, Philips techn. T. 2, 148, 1937. Over een nieuw toestel voor het meten van schrijfsnelheden zie: L. Blok, Philips techn. T. 3, 221, 1938.

heid op te voeren door de bovengenoemde factoren, welke de schrijfsnelheid bepalen, gunstiger te kiezen. Een verhoging van de schrijfsnelheid door verkleinen van de vlekdiаметer (0,8 mm) is echter praktisch niet mogelijk, daar de insnoering van de bundel gelimiteerd wordt door de onderlinge afstooting der electronen. Deze afstooting maakt ook, dat men met het opvoeren van de sterkte van de straalstroom niet verder komt; dit zou nl. een vergroting van de vlekdiаметer tengevolge hebben, welke in verband met de scherpste van het oscillogram niet gewenst is en bovendien een nadeelige invloed heeft op de schrijfsnelheid; deze is nl. bij gegeven lichtsterkte omgekeerd evenredig met de vlekdiаметer.

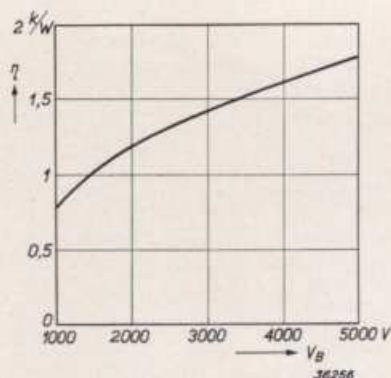


Fig. 1. Rendement η van de omzetting van elektrische energie in licht (kaarsen/watt) als functie van de versnellende spanning V_B van de electronen, die het fluoresceerende scherm treffen.

Wel is het mogelijk een zeer aanzienlijke verbetering te verkrijgen door verhoogen van de versnellende spanning. Ten eerste wordt hierdoor bij constant gehouden stroomsterkte een grooter vermogen in licht omgezet en evenredig met dit vermogen neemt ook de maximale schrijfsnelheid toe. Ten tweede wordt ook het rendement van de omzetting grooter (zie fig. 1), zoodat de geproduceerde lichthoeveelheid bijv. bij een verhoging van de spanning van 1000 op 5000 V niet vijf maal doch meer dan tien maal zoo groot wordt. Ten derde doet zich de onderlinge afstooting der electronen met toenemende snelheid steeds minder gelden, zoodat de lichtende vlek op het scherm kan worden verkleind, hetgeen, zooals we zagen, weer een verhoging van de te bereiken schrijfsnelheid beteekent. Ten vierde zou men in bepaalde gevallen, als men aan deze verkleining van de vlekdiаметer op zichzelf geen behoefte heeft, met toenemende spanning ook de stroomsterkte kunnen opvoeren, waardoor het vermogen en dientengevolge ook de schrijfsnelheid nog sterker zouden toenemen. Praktisch beteekent een verhoging van de span-

ning met een factor 5 een 25- tot 30-voudige verhoging van de maximale schrijfsnelheid.

Een aanzienlijke vergroting van de versnellende spanning is echter bij kathodestraalbuizen met kleine afmetingen, zooals deze voor kofferuitvoeringen van kathodestraaloscillografen in aanmerking komen, niet zonder meer mogelijk. De isolatie van de doorvoerdrazen is bij de buis DN 9-3 berekend voor onderlinge spanningsverschillen van 1000 of desnoods 1200 V. Voor 2000 V zou de constructie van de voet reeds afmetingen verkrijgen, welke voor een kofferapparaat niet in aanmerking komen. Een ander, meer principieel bezwaar van de spanningsverhoging is, dat hierdoor de deflectiegevoeligheid van de buis afneemt, immers de deflectie van de kathodestraal door een bepaalde afbuigspanning is omgekeerd evenredig met de versnellende spanning. Bij een versnellende spanning van 1000 V bedraagt de deflectiegevoeligheid van de buis DN 9-3 voor het eerste platenstel 0,4 mm/V en voor het tweede platenstel 0,3 mm/V, en deze waarden zou men door het verhoogen van de versnellende spanning niet al te sterk willen laten afnemen.

Principe van de naversnellingsbuis

Het is mogelijk de bovenstaande moeilijkheden te overwinnen door de versnelling niet rechtstreeks te laten geschieden maar in twee stappen. Het focusseerende systeem vormt een electronenbundel met een snelheid, overeenkomende met bijv. 1000 V. Deze passeert achtereenvolgens het verticaal en het horizontaal afbuigende systeem en ondergaat daarna een tweede versnelling met behulp van een electrode, die zich op een belangrijk hogere potentiaal bevindt en zoover van de overige elektroden is verwijderd, dat de isolatie geen al te groote moeilijkheden veroorzaakt. Laat men bovendien deze tweede versnelling, de zg. naversnelling van de electronenstraal, zoodanig geschieden, dat daarbij de richting van de straal ongewijzigd blijft, dan zal ook het tweede bezwaar van de hoo-

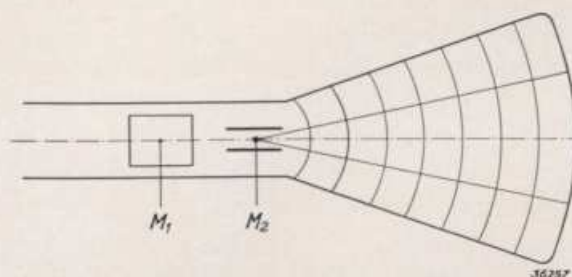


Fig. 2. Principe van de naversnelling zonder vermindering van de deflectie. Achter het afbuigende systeem bevindt zich een versnellend veld, waarvan de equipotentiaalvlakken loodrecht staan op de banen van de electronen.

spanning, de achteruitgang van de gevoeligheid, komen te vervallen.

Willen we de electronen, die het afbuigende systeem verlaten, versnellen, zonder daarbij hun richting te veranderen, dan moeten we een electrisch veld opwekken, waarvan de aequipotentiaalvlakken in elk punt loodrecht staan op de richting van de daar passerende electronenstraal (zie fig. 2). De doorsneden van deze aequipotentiaalvlakken zouden in het horizontale vlak cirkels zijn met het middelpunt M_1 , terwijl ze in het verticale vlak cirkels zouden zijn met het middelpunt M_2 .

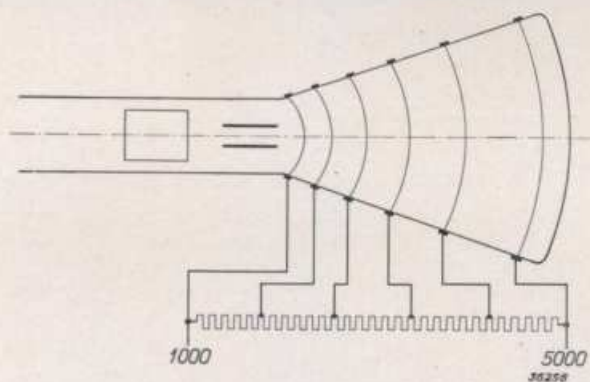


Fig. 3. Een bepaald voorgeschreven potentiaalveld kan worden verwezenlijkt door de randwaarden van de potentiaal op de daarbij behorende wijze vast te leggen.

Om het potentiaalveld in de geheele ruimte het gewenste karakter te geven is het voldoende de potentiaal aan de rand van de buis op de juiste wijze te doen verlopen. Dit kan geschieden door de wand van de buis te bekleeden met ringvormige geleidende strooken, overeenkomende met de snijlijnen van de aequipotentiaalvlakken en de wand van de buis, en deze strooken op de gewenste waarden van de potentiaal te brengen (zie fig. 3). In de praktijk is gebleken, dat een dusdanig ingewikkelde constructie niet noodig is; in plaats van een groot aantal smalle strooken te nemen kan men volstaan met twee breede bekleedsels: één van 1000 V, d.i. de potentiaal, die de snelheid van de electronen in het afbuigende systeem bepaalt, en

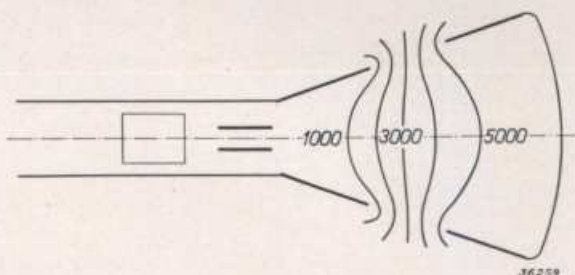


Fig. 4. Principe van de naversnellingsbuis. Dit kan beschouwd worden als een vereenvoudiging van fig. 3. De aequipotentiaalvlakken hebben niet geheel de gewenste vorm.

een op bijv. 5000 V, die de snelheid bepaalt, waarmee de electronen op het fluoresceerende scherm aankomen.

In fig. 4 is dit principe weergegeven. Zooals men ziet uit de aequipotentiaalvlakken, die hierbij ontstaan, heeft het potentiaalveld niet geheel het gewenste karakter en het blijkt dan ook, dat het naversnellende veld de electronenbanen nog wel afbuigt, waardoor de gevoeligheid van de buis met toenemende naversnelling iets afneemt. Wij willen dit verschijnsel iets nader beschouwen, omdat de bestrijding er van eenige invloed heeft gehad op de constructie van de nieuwe buis.

De lenswerking van de naversnellingselectrode ²⁾

Om de beweging van een electron in een electrostatisch veld kwalitatief te beschrijven, kan men vaak met voordeel gebruik maken van een analogie tusschen de baan van een electron in een potentiaalveld en de vorm van een lichtstraal in een medium met in het algemeen veranderlijke brekingsindex. Deze analogie luidt als volgt: Heeft een electron op een plaats met potentiaal nul, de snelheid v_0 en kent men aan elk punt in de ruimte een brekingsindex toe, gegeven door:

$$n = \sqrt{\frac{v_0^2 + \frac{2e}{m} V}{v_0^2}}, \dots (1)$$

waarbij V de potentiaal in het desbetreffende punt is, dan volgt een lichtgolf, welke in dezelfde richting als het electron uitgezonden wordt, ook dezelfde baan als het electron ³⁾.

Passen we deze stelling toe op de ruimte achter het afbuigende systeem van de naversnellingsbuis, dan zien we, dat de electronenstraal na het passeren van het afbuigende systeem in fig. 4 eerst een aantal positief brekende vlakken doorloopt en daarna een aantal minder sterk negatief brekende vlakken. Om dit duidelijk te doen uitkomen, is het optische systeem, dat op deze wijze ontstaat, in

²⁾ De hier volgende beschouwingen zijn het eerst gegeven door W. Rogowski en H. Thiele: Über die Nachbeschleunigung bei Braunschen Röhren, Arch. Elektrot. 33, 411, 1939.

³⁾ Deze stelling kan het gemakkelijkst worden afgeleid uit de analogie tusschen het zg. principe van de kleinste werking van Maupertuis:

$\int \sqrt{T} ds = \text{minimum}$ voor de werkelijk beschreven baan van een massapunt (T kinetische energie, ds baanelement)

en de stelling van Fermat voor de optica:

$\int n ds = \text{minimum}$ voor de door het licht gekozen weg (n brekingsindex).

De grootheid onder het wortelteken in verg. (1) is nl. op een factor na niets anders dan de kinetische energie, waaruit de analogie van electronenbaan en lichtstraal onmiddellijk volgt.

fig. 5b weergegeven, hierbij zijn de dicht bij elkaar gelegen positief resp. negatief brekende vlakken telkens samengevat tot één enkel vlak.

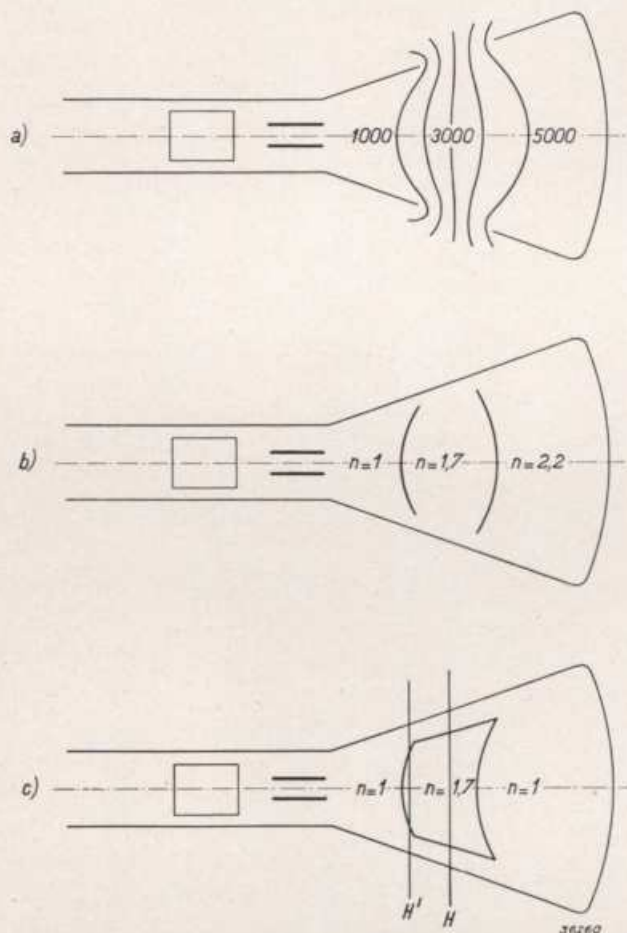


Fig. 5. Lenswerking van het naversnellingsveld.

- a) Vorm van de aequipotentialvlakken.
 b) Lens, welke op een lichtstraal dezelfde brekende werking zou uitoefenen als het elektrische veld op de elektronenbanen.
 c) Lens, welke uit die van b) is afgeleid door bij het laatste vlak zoowel het teken van de kromming als het teken van de sprong in de brekingsindex omgekeerd te nemen, zoodat de brekende kracht van dit vlak dezelfde is gebleven. Het zoo verkregen optisch analogon van het potentiaalveld is een lens in lucht. H' en H hoofdvlakken van die lens.

Het systeem vertoont reeds eenige gelijkenis met een optische lens, alleen met het verschil, dat de brekingsindex in de beeldruimte groter is dan die van de lens zelf. Wij kunnen echter tot meer normale verhoudingen overgaan door de brekingsindex in de beeldruimte weer gelijk 1 te stellen en tevens de kromming van het laatste lensvlak zoodanig te veranderen, dat de brekingseigenschappen van de lens dezelfde blijven. Men verkrijgt dan de in fig. 5c weergegeven lens met een convex en een concaaf oppervlak. De verticale vlakken H en H' in fig. 5c duiden de hoofdvlakken van de lens aan en laten uitkomen, dat men zich de lens

iets dichter bij het afbuigende systeem moet denken dan het midden van de open ruimte tussen de bekleedsels. We zullen nu verder dit optische beeld gebruiken om de invloed van de naversnelling op de afbuiging van de straal te bespreken.

Voor de gevoeligheid van de kathodestraalbuis is het van groot belang, op welke plaats zich deze lens bevindt en hoe sterk deze is. De figuren 6a-f verduidelijken dit. In de gevallen a en b, welke de werkelijk gekozen uitvoering het dichtst naderen, is de lens vrij zwak, maar toch sterk genoeg om de

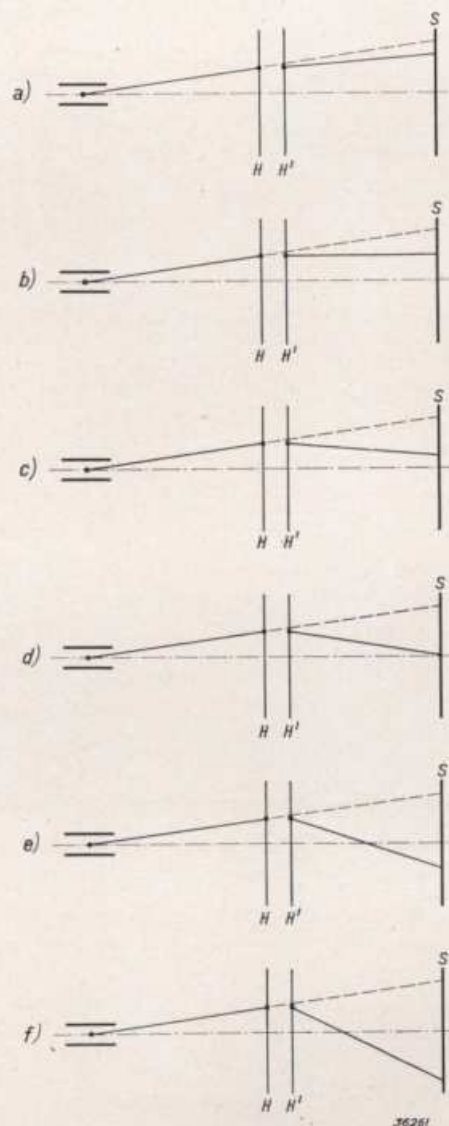


Fig. 6. Invloed van de naversnellingslens op de deflectie van de elektronenstraal door de afbuigplaten.

- a) en b) Zwakke naversnellingslens. De deflectie van de elektronenstraal wordt slechts weinig verminderd.
 c) en d) Sterke naversnellingslens. De deflectie van de elektronenstraal wordt aanzienlijk verminderd en verdwijnt in het laatste geval geheel.
 e) en f) Zeer sterke naversnellingslens. De deflectie van de elektronenstraal heeft op het scherm een richting, tegengesteld aan die bij de afbuigplaten. In het laatste geval is daarbij de absolute waarde van de deflectie tengevolge van de aanwezigheid van de naversnellingslens vergroot.

afbuiging van de straal duidelijk te doen verminderen. Fig. 6c stelt een aanmerkelijk sterkere lens voor. De resterende deflectie van de straal wordt nu zeer klein. Wij zien dus, dat de achteruitgang van de gevoeligheid bij toepassing van naversnelling geenszins altijd kleiner behoeft te zijn dan bij een directe versnelling van de electronenstraal. Zelfs kan het geschieden, dat van de gevoeligheid in het geheel niets overblijft (fig. 6d), of dat het teken van de afbuiging door de naversnellingslens omgekeerd wordt (fig. 6e). In het laatste geval is het theoretisch zelfs mogelijk de sterkte van de naversnellingslens zoodanig op te voeren, dat de absolute waarde van de afbuiging groter wordt dan de oorspronkelijke afbuiging bij afwezigheid van naversnelling (fig. 6f). Practisch zal men van de mogelijkheden e en f niet zonder meer gebruik kunnen maken, omdat een zeer sterke afbuiging van de straal altijd gepaard gaat met groote vervormingen. Wij zijn dus aangewezen op de gevallen a , b , c , waarbij de gevoeligheid door de werking van de naversnelling wordt verminderd, en kunnen alleen trachten de omstandigheden zoodanig te kiezen, dat deze vermindering zoo gering mogelijk is.

In de eerste plaats zal men hiertoe de lens zelf zoo zwak mogelijk willen maken. De sterkte van de lens neemt toe met toenemende naversnellingsspanning, zoodat men in de practijk deze naversnellingspanning niet groter zal maken dan voor het op te nemen verschijnsel noodzakelijk is. Doorslaggevend voor de sterkte is in werkelijkheid niet de absolute waarde van de spanning, maar de verhouding tusschen de spanningen van het eerste en laatste

bekleedsel. Men zou dus ook kunnen denken de lens zwakker te maken door de spanning van het eerste bekleedsel te verhoogen. Hierin is men echter, zooals reeds vermeld werd, in het beschouwde geval door overwegingen van constructieve aard beperkt tot ongeveer 1000 V.

Heeft men de spanningen van de bekleedsels gekozen, dan kan men de sterkte van de lens nog beïnvloeden door doelmatige constructie van de electroden. Om de lens zoo zwak mogelijk te maken moet de diameter van de electroden zoo groot mogelijk zijn. Door de electroden als wandbekleedsels uit te voeren, is aan deze voorwaarde voldaan, de diameter van de buis is uit den aard der zaak beperkt door de grootte van het oscillograafapparaat. Verder neemt de sterkte van de lens toe met toenemende afstand tusschen de bekleedsels en deze zou dus zoo klein mogelijk moeten worden genomen. Een practische grens vormt hierbij de eisch van een voldoende isolatie; hierop zal in het volgende nog nader worden ingegaan.

Tenslotte kan men trachten, de plaats van de lens in de buis zoodanig te kiezen, dat haar afbuigende werking zoo klein mogelijk is. In dit opzicht blijkt bij gegeven sterkte van de lens nog eenige variatie mogelijk te zijn.

Berekent men voor een zwakke lens de grootte van de uiteindelijk verkregen deflectie als functie van de plaats van de lens, dan vindt men, dat deze deflectie een minimum heeft, indien de lens symmetrisch is gelegen ten opzichte van het punt midden tusschen de afbuigplaten en het punt midden op het scherm. Elke verplaatsing uit dit symmetrievlak

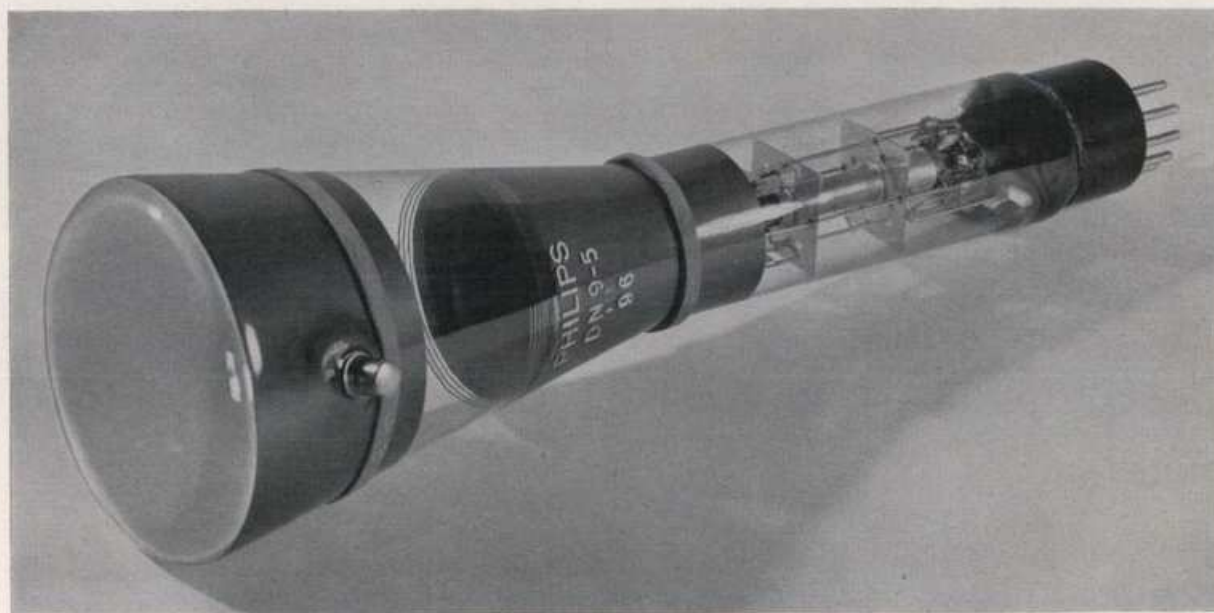


Fig. 7. Foto van de naversnellingsbuis DN 9-5.

36252

verbetert dus de gevoeligheid. Men zou bijv. kunnen trachten de lens zoo ver mogelijk naar het scherm te verplaatsen. Hierin zijn wij echter beperkt, doordat, zooals wij gezien hebben, de lens altijd verder van het scherm af is gelegen dan de open ruimte tusschen de bekleedsels, die zelf eveneens op een niet al te kleine afstand van het scherm moeten worden aangebracht, omdat anders de potentiaal niet over het geheele oppervlak van het niet geleidende scherm de gewenschte hooge waarde verkrijgt. Tracht men omgekeerd de lens zoo ver mogelijk naar het afbuigende systeem te verplaatsen, dan ontstaan uit dien hoofde geen moeilijkheden, echter worden dan de equipotentiaalvlakken van het naversnellingsveld door de aanwezigheid van het veld der afbuigende platen, dat niet rotatiesymmetrisch is, gedeformeerd, zoodat de lens astigmatisme gaat vertoonen. Deze moeilijkheid blijkt echter niet onoverwinnelijk te zijn, zoodat deze tweede methode de voorkeur verdient. Wij zullen bij de bespreking van de practische uitvoering nog zien, hoe het astigmatisme werd gecorrigeerd.

Uitvoering van de naversnellingsbuis

Fig. 7 is een foto van de naversnellingsbuis DN 9-5. Zoowel de uitwendige afmetingen als het inwendige electrodensysteem komen in hoofdzaak

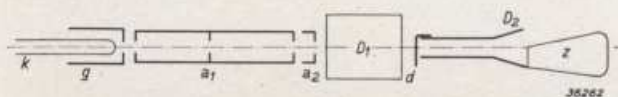


Fig. 8. Het inwendige electrodensysteem van de kathodestraalbuis DN 9-5 met naversnelling. *k* kathode, *g* regelelektrode, *a*₁ focusseeringsanode met spanning van ca 275 V, *a*₂ versnellingsanode met spanning van 1000 V, *D*₁ en *D*₂ afbuigsystemen, *d* staafjes ter bestrijding van trapeziumvervorming, *z* zwaarden ter bestrijding van astigmatisme en vertekening tengevolge van de naversnelling.

overeen met de vroeger uitvoerig beschreven ⁴⁾ buis DN 9-3 van de kathodestraaloscillograaf GM 3152. Het meest belangrijke verschil is, dat het

⁴⁾ J. D. Veegens, Philips techn. T. 4, 210, 1939.

geleidende bekleedsel van de binnenwand van de buis gesplitst is in twee bekleedsels *A* en *B*, waarvan het gedeelte *A*, evenals bij de buis DN 9-3, met de anode van het focusseerende systeem is verbonden en op een spanning van 1000 V ten opzichte van de kathode komt te staan, terwijl het bekleedsel *B* een aparte doorvoer naar buiten bezit, waarop een willekeurige spanning tusschen 1000 en 5000 V kan worden gezet ⁵⁾.

Beide bekleedsels bestaan in hoofdzaak uit een neerslag van grafiet op de binnenwand van het glas. Om de rand van electrode *A* gladder te maken, teneinde de overslagspanning te verhoogen, werd het grafiet aan de rand vervangen door platina; bovendien liggen vóór deze rand enkele ringvormige strooken van het platina-neerslag, welke niet op een bepaalde potentiaal zijn gezet, maar zich vrij kunnen opladen. Deze strooken beïnvloeden de potentiaalverdeling tusschen de bekleedsels op een zoodanige wijze, dat de doorslagspanning nog hooger wordt. Op deze wijze werd bereikt, dat de spanning op de electrode *B* tot 5000 V kan worden opgevoerd zonder het gevaar van overslag tusschen de bekleedsels.

Het inwendige electrodensysteem van de naversnellingsbuis is in fig. 8 schematisch weergegeven, terwijl fig. 9 een foto van dit systeem laat zien. De electronen, welke de kathode *k* verlaten en de regelelektrode *g* passeeren, worden versneld door de buisvormige anoden *a*₁ en *a*₂, waarvan de eerste op een instelbare focusseeringsspanning van ca 275 V wordt gebracht en de laatste op de versnellingspanning van 1000 V.

De electronenstraal, die het focusseerende systeem verlaat, passeert verder de twee stellen afbuigplaten *D*₁ en *D*₂, die resp. dienen voor de verticale en horizontale afbuiging van de electronenstraal.

⁵⁾ Hiertoe dient een apart handig voedingsapparaat GM 4198, dat een regelbare spanning levert van 0 tot 5 kV. Dit voedingsapparaat is aangepast bij de meetapparaten, welke van de naversnellingsbuis zijn voorzien, nl. de kathodestraal-drukindicatieur GM 3154 en de kathodestraaloscillograaf GM 3156.

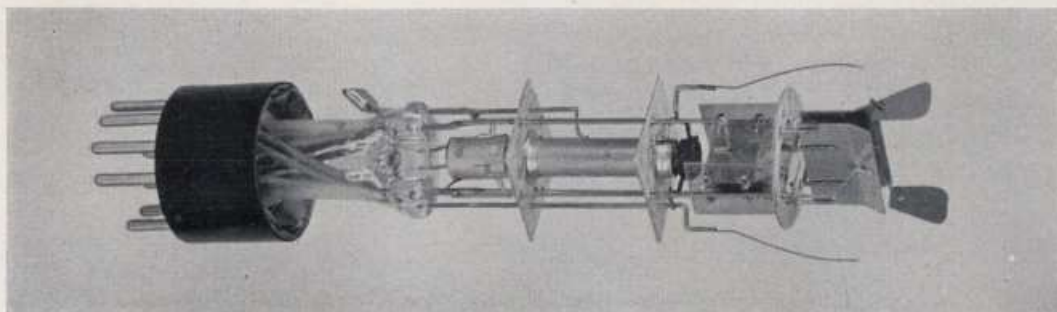


Fig. 9. Foto van het inwendige systeem van de naversnellingsbuis.

Het systeem D_2 draagt twee staafjes d ; deze dienen om de zg. trapeziumvervorming op te heffen, welke optreedt, wanneer op het tweede stel afbuigplaten een niet gebalanceerde spanning wordt gezet⁶⁾.

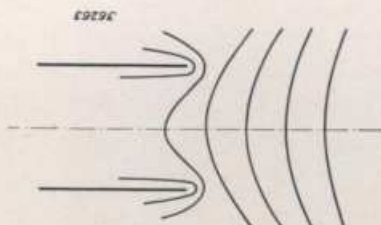


Fig. 10. De equipotentiaalvlakken van het naversnellingsveld worden door het tweede stel afbuigplaten als het ware samengeperst, hetgeen aanleiding geeft tot astigmatisme.

Tengevolge van het naversnellen treden nog twee andere vervormingen op, nl.:

- 1) een astigmatisme van de electronenbundel, waarop reeds naar aanleiding van de keuze van de plaats der naversnellingslens werd gewezen;
- 2) een tonvormige vertekening van het oscillogram.

Beide verschijnselen zijn te wijten aan het feit, dat het potentiaalveld van de naversnellingselectrode tusschen de afbuigplaten dringt en hierbij een vervorming ondergaat, zooals in fig. 10 is geschetst. De equipotentiaalvlakken worden door het platenstel D_2 in het vlak van tekening, dus in het horizontale vlak, sterker gekromd dan in het verticale vlak, hetgeen in de optische taal beteekent, dat vóór de eigenlijke naversnellingslens een cylinderlens is geplaatst.

Deze cylinderlens versterkt de electronenlens in

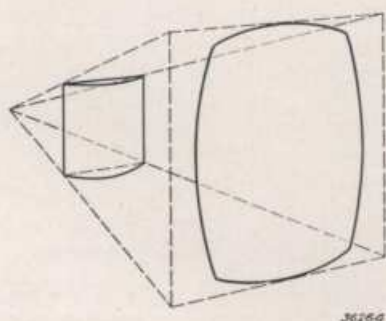


Fig. 11. Werking van een astigmatische lens (cylinderlens). Een oorspronkelijk rechthoekige bundel wordt in één richting samengedrukt en bovendien „tonrond” vervormd.

⁶⁾ Bij de gebruikelijke toepassing van de kathodestraalbuis wordt de horizontale afbuiging verkregen met behulp van een zaagtandgenerator. Deze levert bij de kathodestraal-oscillograaf GM 3152 een niet gebalanceerde spanning, dwz. de potentiaal van één aansluitklem van de generator is constant, terwijl die van de andere varieert. Om geen trapeziumvervorming te verkrijgen, moet men die klem, welke een veranderlijke potentiaal heeft, aansluiten op de plaat, waaraan de staafjes zitten.

het horizontale vlak, zoodat de bundel op het scherm geen brandpunt meer bezit, maar een brandlijn. Bovendien vervormt zij het oscillogram op de in fig. 11 weergegeven wijze: ten eerste vermindert ze de gevoeligheid van het systeem in de richting van de tijdbasis, ten tweede geeft ze aanleiding tot een tonvormige vertekening van het oscillogram.

Het astigmatisme en de daaruit voortvloeiende vertekening kunnen worden bestreden door een plaat van het stel D_2 van zwaardvormige aanhangsels te voorzien (zie fig. 9 en nog duidelijker fig. 12). Deze zwaarden leveren een extra-focusseering van de bundel in een richting loodrecht op de extra-focusseering door het platenstel D_2 en bestrijden daardoor het astigmatisme. Maakt men de zwaarden zoo groot, dat het astigmatisme juist opgeheven wordt, dan blijkt ook de tonvormige vertekening te verdwijnen.

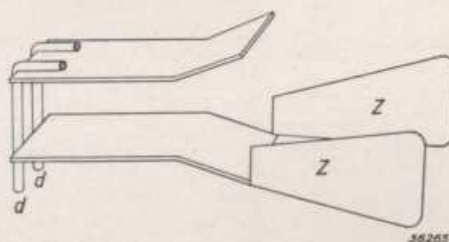


Fig. 12. Het tweede systeem van afbuigplaten (D_2) met staafjes d en zwaarden z .

Eigenschappen van de naversnellingsbuis

Focusseeringsspanning

Fig. 13 geeft het verloop van de focusseeringsspanning met de naversnellingsspanning. Zooals reeds opgemerkt werd bij de bespreking van het astigmatisme, heeft de naversnellingslens ook een focusseerende werking op de bundel. Wordt de buis ingeschakeld zonder naversnelling, en gefocuseerd, dan dient de focusseeringspanning van de electrode a_1 verhoogd te worden, zoodra de naversnelling bijgeschakeld wordt. Immers hierdoor wordt de sterkte van de lens a_1-a_2 kleiner, hetgeen noodig is om de som van de lenssterkten constant te doen blijven.

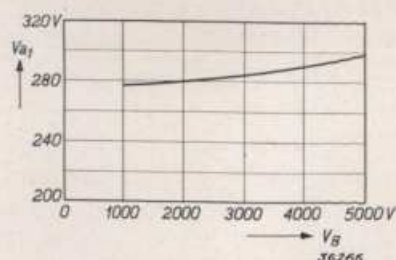


Fig. 13. Verloop van de focusseeringspanning, die op de anode a_1 moet worden gezet om een scherpe vlek te verkrijgen, als functie van de spanning, die de naversnellingsselectrode heeft ten opzichte van de kathode.

Deflectiegevoeligheid

Fig. 14 geeft het verband tussen de deflectiegevoeligheid en de naversnelling. Hierbij is de spanning van a_2 en het bekleedsel A constant gehouden op 1000 volt, terwijl die van het tweede bekleedsel tussen 1000 en 5000 volt varieert. De gevoeligheidsreductie is des te groter, naarmate de naversnelling sterker is, zooals reeds eerder werd aange- toond.

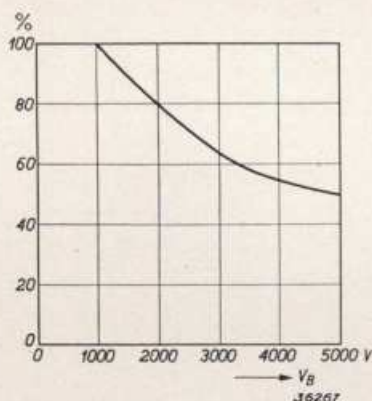


Fig. 14. Relatieve verandering van de deflectiegevoeligheid als functie van de spanning van de naversnellingselectrode ten opzichte van de kathode.

Bij naversnelling met een spanning van 5000 V ten opzichte van de kathode bedraagt de gevoeligheid de helft van die zonder naversnelling. Zou men hetzelfde systeem zonder naversnelling met een anodespanning van 5000 V laten werken, dan zou de gevoeligheid 1/5 van die bij 1000 V bedragen, zodat dus de naversnelling, wat de gevoeligheid betreft, een factor 2,5 gunstiger is dan een directe versnelling van de elektronenstraal.

Beeldgrootte en -scherpte

De vermindering van de deflectiegevoeligheid met toenemende naversnelling gaat uiteraard gepaard met een vermindering van de beeldgrootte, die maximaal bereikt kan worden, zonder dat het oscillogram vervormd of door de afbuigplaten onderschept wordt. Bij het ontwerp van de buis werd uitgegaan van het doel, de buis bij een spanning op het scherm van 1000 V (dus zonder naversnelling) eenzelfde gevoeligheid te geven als die, welke de buis DN 9-3 bezit. De afbuigplaten zijn dan ook zoo gedimensioneerd, dat bij 1000 V het gehele scherm bestreken kan worden.

Bij maximale naversnelling (5000 V t.o.v. kathode) is dat echter niet meer mogelijk. Het grootste oscillogram, dat zonder vervorming kan worden verkregen, heeft afmetingen van 40 bij 40 mm, terwijl het scherm op zichzelf voldoende plaatsruimte biedt voor een beeld van 65 bij 65 mm. Deze reductie van de beeldgrootte betekent echter geenszins een verlies aan

details, daar de fluorescentievlek met toenemende spanning scherper wordt; bij constant gehouden bundelstroom blijkt de verkleining van de vlek met toenemende spanning op het scherm ongeveer even groot te zijn als de verkleining van het oscillogram tengevolge van de afnemende deflectiegevoeligheid.

Schrijfsnelheid

Uitgebreide proeven zijn gedaan ter bepaling van de maximale schrijfsnelheid. Hierbij werd weer gebruik gemaakt van een camera met een lensopening 1 : 3,2 en rolfilm Agfa-Isopan. Heeft de naversnellingselectrode een spanning van 5000 V ten opzichte van de kathode, dan verkrijgt men bij een viervoudige verkleining en een bundelstroom van 20 μ A een maximaal te registreeren schrijfsnelheid van 24 km/sec. Bij een spanning van 1000 V verkrijgt men onder overigens dezelfde condities de reeds genoemde schrijfsnelheid van 850 m/sec, zodat dus een winst van een factor 25 is behaald.

Bij metingen in het laboratorium zullen veelal lenzen met grotere openingen, bijv. 1 : 1,5, ter beschikking staan, waarmee een schrijfsnelheid van 100 km/sec kan worden verkregen.

Tenslotte nog eenige praktische wenken voor het gebruik van de naversnellingsbuis.

De naversnellingsspanning mag niet op het scherm worden aangesloten, zolang de fluorescentievlek stil staat. Tengevolge van het hoge vermogen zou de vlek onmiddellijk inbranden, hetgeen betekent, dat op de plaats, waar het scherm door electronen van hoge energie wordt getroffen, de gevoeligheid van het scherm voor electronen van lage energie merkbaar afneemt. Ook een rechte lijn, dus een afbuiging met één stel platen, biedt geen zekerheid, dat het inbranden wordt voorkomen. Staat echter op beide afbuigplaten een wisselspanning, dan kan men bij een bundelstroom van bijv. 5 μ A het beeld continu op het scherm laten staan, zonder dat zelfs bij de hoogste naversnellingsspanning een kans op inbranden bestaat. (Deze bundelstroom van 5 μ A is voldoende om op het scherm een beeld te doen ontstaan, dat ook in een verlichte kamer goed te zien is.) Bij opnamen van korte duur kan men tot 20 μ A gaan. Voor zeer snelle verschijnselen zal men de regelelectrode eenvoudig met de kathode verbinden, waardoor een bundelstroom van ca. 50 μ A wordt verkregen. Men dient dan echter bij de proefinstelling op scherpte en gewenschte beeldgrootte zeer snel te werk te gaan, daar het beeld in dat extreme geval slechts enkele seconden op het scherm mag staan.

EEN FOTOCCEL MET VERSTERKING DOOR SECUNDAIRE EMISSIE

door M. C. TEVES.

621.383.2

Voor het versterken van fotostroomen kan men met voordeel gebruik maken van secundaire emissie. De vroeger beschreven multiplicatorbuis, welke op dit principe berust, levert in het geval van zeer zwakke fotostroomen, die met zeer hoge frequentie variëren (televisie), goede diensten, is echter te gecompliceerd om voor eenvoudiger toepassingen, bijv. bij de sprekende film, in aanmerking te komen. Een eenvoudiger constructie, die hiervoor wel geschikt is, wordt in dit artikel beschreven. Het versterkergedeelte bestaat uit drie trappen met secundaire emissie en werkt in tegenstelling tot dat van de multiplicatorbuis zuiver electrostatisch, zoodat er geen uitwendige magnetische velden bij te pas komen. Verkregen wordt een ongeveer 100-voudige versterking en daardoor een foto-electrische gevoeligheid van 2 à 3 mA/lm.

Bij vrijwel alle toepassingen van fotocellen, bijv. in signaal- en tel-installaties, in sprekende film-toestellen, in televisie-zendinstallaties, enz. zijn de verkregen stroomen te zwak om rechtstreeks te kunnen worden gebruikt, zoodat het practisch steeds noodig zal zijn om de stroom te versterken. In de eerste plaats komen hiertoe de uit de radio-techniek bekende versterkerschakelingen in aanmerking. Daarnaast is het tot op zekere hoogte mogelijk de fotostroom reeds in de buis zelf te versterken met behulp van een vulling van edelgas, waarin elk foto-electron door ionisatie van gas-atomen nieuwe electronen kan vrijmaken. Een derde mogelijkheid is het toepassen van secundaire emissie, dat wil zeggen, het vrijmaken van secundaire electronen uit een hulpanode, die door de primaire foto-electronen wordt getroffen. Bij een geschikte keuze van het materiaal van de hulpanode en van de spanning geeft elk primair electron aanleiding tot de emissie van 5 à 6 secundaire electronen, zoodat de stroom met een factor 5 à 6 kan worden versterkt. Indien gewenscht kan dit proces een aantal malen worden herhaald, waardoor een zeer hoge versterking kan worden verkregen.

De voordeelen van het versterken met behulp van secundaire emissie boven het versterken met behulp van versterkerbuizen zijn reeds in een vroeger artikel in dit tijdschrift ¹⁾ uiteengezet. Zij zijn hoofdzakelijk te danken aan het feit, dat de secundaire emissie geen ruststroom veroorzaakt, dwz. wanneer de foto-electrische stroom nul is, leveren ook de secundair emitteerende platen geen stroom. Bij een versterkerbuis is daarentegen ook bij afwezigheid van de te versterken spanning een bepaalde anodestroom aanwezig en deze vertoont zekere fluctuaties (ruischen), welke bij versterking van zeer kleine signalen zeer hinderlijk kunnen zijn. De versterking door middel van een

gasvulling is, wat het ruischen betreft, ongunstiger dan de versterking met behulp van secundaire emissie. Bovendien is het niet mogelijk om met behulp van een gasvulling een willekeurig groote versterking te bereiken en tenslotte vertoont de stroom in het gas tengevolge van de betrekkelijk langzame beweging van de positieve ionen traagheidsverschijnselen ²⁾, welke tot uiting komen in een afname van de versterking met toenemende frequentie en welke reeds bij acoustische frequenties duidelijk merkbaar zijn.

Uit deze overwegingen blijkt, dat het zoowel voor het versterken van fotostroomen met zeer hoge frequentie (televisie) als ook voor sprekende-film-installaties zin kan hebben om fotocellen met versterking door secundaire emissie toe te passen. Een voor het laatstgenoemde doel bestemde fotocel met drie trappen versterking door secundaire emissie werd in dit laboratorium ontwikkeld en vormt het onderwerp van dit artikel.

Eischen, waarvan bij het ontwerp werd uitgegaan

De eischen, die men moet stellen aan een fotocel voor toepassing in geluidsfilm en dergelijke, zijn geheel andere dan die, welke aan de reeds eerder beschreven fotocel met secundaire emissie ³⁾ (multiplicatorbuis) werden gesteld. Voor deze buizen, welke voornamelijk in de televisietechniek gebruikt worden, is het niet al te belangrijk, hoe omvangrijk of gecompliceerd de constructie is en hoeveel moeite de instelling en regeling vereischt, aangezien voor het gestelde doel: een lineaire, van de frequentie onafhankelijke en ruischvrije versterking van de daarbij optredende, zeer zwakke fotostroomen met intensiteitswisselingen van zeer hoge frequentie, practisch geen andere oplossing ter beschikking staat.

Bij de sprekende film daarentegen, waarbij de

¹⁾ Zie H. Rinia en C. Dorsman, Televisie-installatie met schijf volgens Nipkow, Philips techn. T. 2, 72, 1937, speciaal blz. 74.

²⁾ Zie A. A. Kruithof, Philips techn. T. 4, 57, 1939.

³⁾ Zie J. L. H. Jonker en M. C. Teves, Philips techn. T. 3, 137, 1938.

benodigde versterking op vele wijzen kan worden verkregen, is de toepassing van een fotocel met secundaire emissie slechts gewettigd, wanneer de eventuele hierdoor veroorzaakte complicaties minder belangrijk zijn dan de vereenvoudigingen, welke dank zij de grootere sterkte van de verkregen fotostroom mogelijk worden bij andere onderdeelen van het apparaat.

In de eerste plaats is hiertoe gewenscht, dat de benodigde spanning van de fotocel niet hoger is dan de spanning, die door de plaatsspanningsapparaten van normale sprekende-film-versterkers kan worden geleverd (500 à 650 V). Ook moet het niet noodzakelijk zijn, dat de spanning nauwkeurig constant en precies bij de buis aangepast is, zoodat men bijv. de buis tegen een nieuwe buis kan verwisselen, zonder dat het apparaat opnieuw moet worden afgeregeld. Tenslotte is het gewenscht de afmetingen van de fotocel dusdanig te beperken, dat ze geen bezwaar vormen voor het inbouwen van de fotocel in een toonkop van gebruikelijke constructie.

De beperking in de beschikbare spanning beteekent of een beperking van het aantal secundair emitterende elektroden of een beperking van de beschikbare spanning per trap. Op beide wijzen wordt de versterkingsfactor begrensd. Het beste compromis ligt bij een spanning van ongeveer 150 V per trap. Men komt op deze wijze tot drie trappen versterking door secundaire emissie. Deze vereischen dus een spanning van 450 V. De potentiaal van de eindanode moet nog een zeker bedrag hoger zijn dan die van de laatste secundair emitterende plaat, om alle door deze plaat uitgezonden electronen naar zich toe te kunnen trekken, zal echter niet hoger dan 650 V behoeven te worden gekozen.

De met drie trappen secundaire emissie te verkrijgen versterking bedraagt ongeveer een factor 100. Dit beteekent practisch, dat men bij de constructie van het apparaat, dat op de fotocel wordt aangesloten, tenminste één versterkerbuis zal kunnen besparen, terwijl tevens het ruisniveau lager en de weergave van hooge frequenties beter zullen zijn.

Wat de tweede eisch betreft (ongevoeligheid tegenover schommelingen van de spanning), levert de vroeger beschreven constructie van de multiplicatorbuis geen bevredigende oplossing. Bij deze constructie, die we in *fig. 1* nog eens weergeven, wordt de beweging van de electronen bepaald door de elektrische velden van de opeenvolgende elektroden en door een magnetisch veld, dat loodrecht staat op het vlak van tekening. Om de gewenschte

electronenbanen te verkrijgen, moet dit magnetisch veld in sterkte en in richting zorgvuldig afgeregeld worden, en daar de kromming van de banen afhangt van de verhouding tusschen de magnetische en de elektrische veldsterkte, moeten ook de potentialen van de elektroden nauwkeurig constant worden gehouden.

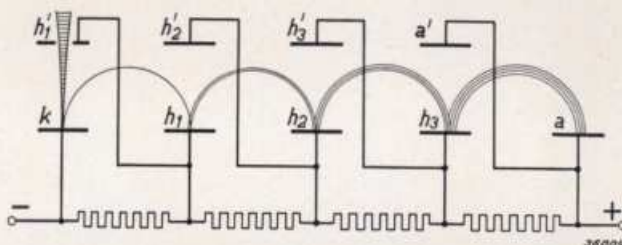


Fig. 1. Multiplicatorbuis met electrostatische en magnetische afbuiging van de electronen. Een lichtstraal doet uit de fotokathode k electronen uittreden, welke achtereenvolgens uit de hulpanoden h_1, h_2, h_3 secundaire electronen vrijmaken. De elektroden h_1', h_2', h_3' dienen om de gewenschte elektrische velden te verkrijgen. Het magnetisch veld staat loodrecht op het vlak van tekening.

Het ligt voor de hand, dit bezwaar te onder-
vangen door voor het ombuigen der electronen-
banen alleen electrostatische velden te gebruiken.
Immers in dat geval kunnen de benodigde velden
door het electrodensysteem van de buis worden
gevormd, zoodat geen uitwendige onderdeelen ten
opzichte van de buis moeten worden ingesteld.
Bovendien zijn dan de electronenbanen bij vol-
doend lage beginsnelheden van de electronen ge-
heel bepaald door de onderlinge verhouding
van de potentialen der verschillende elektroden
en niet door hun absolute waarde, die derhalve
voor de werking van de buis alleen in zooverre van
belang zijn, als ze invloed hebben op de versterkings-
factor van de secundair emitterende plaatjes.

In de laatste jaren zijn een groot aantal construc-
ties van zuiver electrostatisch werkende multi-
plicatorsystemen bekend geworden, waarvan eenige
voorbeelden in het in noot ³⁾ aangehaalde artikel
werden beschreven. Deze constructies hebben echter
zekere nadeelen, die in het genoemde artikel verder
uiteengezet zijn en die gemaakt hebben, dat geen
van deze constructies kon wedijveren met de ge-
mengd electrostatisch-magnetische afbuiging der
electronen. Inmiddels is echter een nieuwe en zeer
eenvoudige constructie bekend geworden ⁴⁾, welke
voor ons doel groote voordeelen biedt.

Electrodensysteem met electrostatische focusseering

Fig. 2 geeft een doorsnede van het systeem met

⁴⁾ V. K. Zworykin en J. A. Rajchman, Electrostatic electron multiplier, Proc. Inst. Radio Eng. **27**, 558-566, 1939.

de daarin verkregen electronenbanen. Het systeem bestaat uit een aantal elektroden van opklimmende potentiaal, welke zoodanig om elkaar heengrijpen, dat de secundaire electronen, welke een bepaald

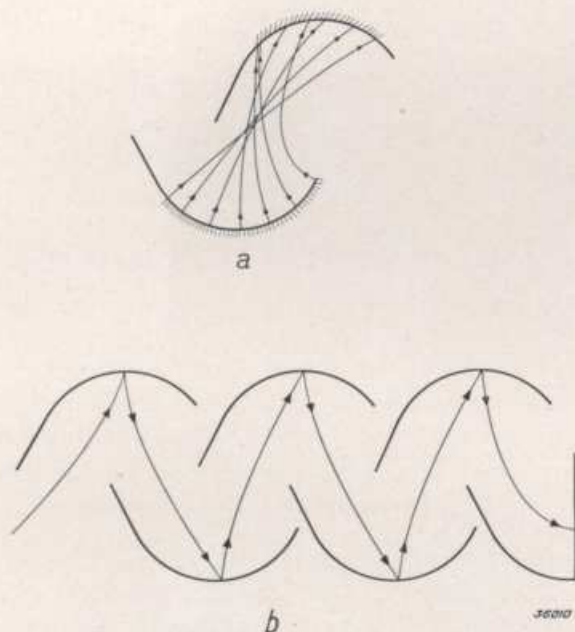


Fig. 2. a) Banen van de electronen tusschen twee op elkaar volgende elektroden van een multiplicator met zuiver electrostatische focusseering. De electronen, die op het gearceerde gebied van de onderste elektrode worden vrijgemaakt, komen op het overeenkomstige gearceerde gebied van de bovenste elektrode terecht; de bundel wordt dus door het passeeren van de op elkaar volgende trappen niet verbreed.

b) Vijf op elkaar volgende trappen van een multiplicator met electrostatische focusseering.

gedeelte van één elektrode verlaten (gearceerd in de figuur), door de volgende elektrode worden aangetrokken en daar binnen het overeenkomstige gedeelte terecht komen. Op deze wijze kan men in principe een willekeurig groot aantal trappen achter elkaar schakelen, alleen moet men door een geschikte vorm van de beginelektrode er voor zorgen, dat de foto-electronen inderdaad op het gearceerde gedeelte van de eerste hulpanode worden gefocusseerd.

Uitgaande van de gebruikelijke bolvormige fotokathode kan dit geschieden op een wijze, zooals in fig. 3 is weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van het feit, dat het elektrische veld tusschen de fotokathode en de anode een focusseerende werking heeft op de electronen, zoodanig, dat op de anode een sterk verkleind beeld van de kathode ontstaat. Maakt men een opening in de anode, dan zullen hierdoor alle foto-electronen treden, die afkomstig zijn van een bepaald gebied van de fotokathode, en wel van een gebied, dat belangrijk grootter is dan de opening. Op deze wijze is het mogelijk de

electronen uit alle deelen van de fotokathode, die voor directe belichting van buiten in aanmerking komen, in een betrekkelijk nauwe, goed homogene en goed gerichte bundel te vereenigen.

Dank zij deze concentratie van de electronenbundel is het mogelijk geweest, het verdere deel van de fotocel, waarin drie malen versterking door secundaire emissie optreedt, zeer klein te dimensionneeren. Het geheele electrodensysteem, bestaande uit de anode van de fotocel, drie secundair emitterende hulpanoden en de eindanode, is ca 2 cm lang, terwijl de diameter van de bolvormige fotocel 4 cm bedraagt. De grootte van het gebied op de kathode, waarvan de foto-electronen in het multiplicatorgedeelte terechtkomen, bedraagt ongeveer 1 cm^2 . Op dit gebied moet dus het van buiten afkomstige licht worden geconcentreerd. Een gedeelte van het invallende licht wordt door de fotokathode gereflecteerd en naar andere deelen van deze kathode gekaatst. De door dit verstrooide licht vrij gemaakte foto-electronen gaan eveneens naar de anode, ze vallen echter niet door de opening. Op deze wijze gaat ongeveer $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ van de totale emissie van de fotokathode verloren.

Een verder verlies treedt op, doordat niet alle electronen de gewenschte weg van één secundair emitterende elektrode naar de volgende afleggen. Dit komt, omdat er bij de botsing van een electron op een elektrode behalve secundaire electronen met een snelheid van 0-15 V (met een maximum in de snelheidsverdeling bij ca 5 V), ook rechtstreeks gereflecteerde electronen ontstaan, welke nagenoeg de energie van de opvallende electronen hebben (150 V). Voor deze zeer snelle electronen is het systeem niet berekend. Ze zullen tenslotte ook wel

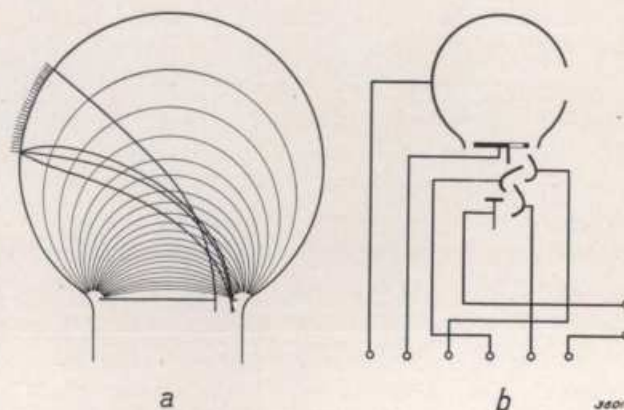


Fig. 3. a) Banen der foto-electronen tusschen een bolvormige fotokathode en een platte anode (de dunne lijnen zijn equipotentiaallijnen). De fotokathode wordt op de anode verkleind afgebeeld. De uit het gearceerde deel van de fotokathode vrij gemaakte electronen gaan door de opening van de anode en worden in het daarachter geplaatste multiplicatorsysteem vermenigvuldigd.

b) Doorsnede van het systeem.

de laatste anode bereiken, maar eventueel één of meer electroden overslaan en daardoor minder aanleiding geven tot versterking van de anodestroom.

Deze verliezen maken het begrijpelijk, dat de totale versterking kleiner is dan het product van de versterkingsfactoren van de afzonderlijke trappen. Zendt elk van de secundair emitterende electroden gemiddeld 6 electronen uit per primair invallend electron, dan zou de verhouding tusschen de stroom naar de laatste anode en de stroom, die de multiplier binnen treedt, theoretisch $6^3 = 216$ moeten bedragen, terwijl ze in werkelijkheid ongeveer 130 bedraagt; de verhouding van de stroom naar de laatste anode tot de totale oorspronkelijke fotostroom bedraagt dan ongeveer een factor 100.

Constructie van de fotocel

De uitgevoerde constructie sluit nauw aan bij de schematische voorstelling, die in fig. 3 werd weergegeven. De foto-electrisch gevoelige laag is direct op het glas van de bolvormige bovenhelft van de ballon aangebracht, terwijl de vijf overige electroden op een glazen kneep zijn gemonteerd, welke de toevoerdraden van deze electroden naar beneden uitvoert. De toevoerdraad van de fotokathode is afzonderlijk naar boven uitgevoerd. Fig. 4 is een foto van de fotocel met de versterkingstrappen, waarop de diverse electroden, met uitzondering van de eerste anode, duidelijk zijn te zien.

Een speciaal probleem is het vereenigen van het foto-electrisch gevoelige oppervlak met de secundair emitterende oppervlakken in één buis. Zooals reeds eerder bij de beschrijving van de multiplierbuis werd uiteengezet⁵⁾, is het wenschelijk voor deze oppervlakken hetzelfde materiaal te nemen, daar anders het gevaar bestaat, dat de oppervlaktelagen elkander bij het prepareren nadeelig beïnvloeden. Als een mogelijke oplossing werd aangegeven het gebruik van een zilveren onderlaag, bedekt met caesiumoxyde en geadsorbeerd caesium. Bij een dergelijke laag hebben de caesiumoxyde-moleculen een zeer hoog secundair emitterend vermogen, terwijl de geadsorbeerde caesium-atomen een hooge foto-electrische gevoeligheid bezitten.

Om nu het secundair emitterend vermogen evenals de foto-electrische gevoeligheid tot een maximum op te voeren, zou men de oxydatie van de secundair emitterende electroden verder moeten voeren dan die van de fotokathode, nl. liefst zo ver, dat al het geadsorbeerde caesium in caesiumoxyde omgezet was. Een dergelijke verschillende

behandeling van de overigens identieke electroden brengt echter groote moeilijkheden met zich mede, omdat tijdens het prepareren een neiging bestaat voor het instellen van een evenwicht, waarbij alle electroden procentueel even veel caesium adsorbeeren. Het is echter gelukt deze moeilijkheden te overwinnen door de secundair emitterende electroden vóór het bedekken met caesiumoxyde zoodanig te behandelen, dat ze practisch geen caesium adsorbeeren, zoodat bij het gemeenschappelijk prepareren van de fotokathode en de secundair emitterende electroden op de laatstgenoemde geen overmaat caesium ontstaat.

Op deze wijze konden we een gevoelige fotokathode (20-30 $\mu\text{A/lm}$) en een electrode met hoog secundair emitterend vermogen (vermenigvuldigingsfactor ca 6 bij 150 V) in een buis vereenigen, zonder dat bij het vervaardigen van de fotokathode een andere productiewijze gevolgd zou moeten worden, dan voor normale fotocellen gebruikelijk is.

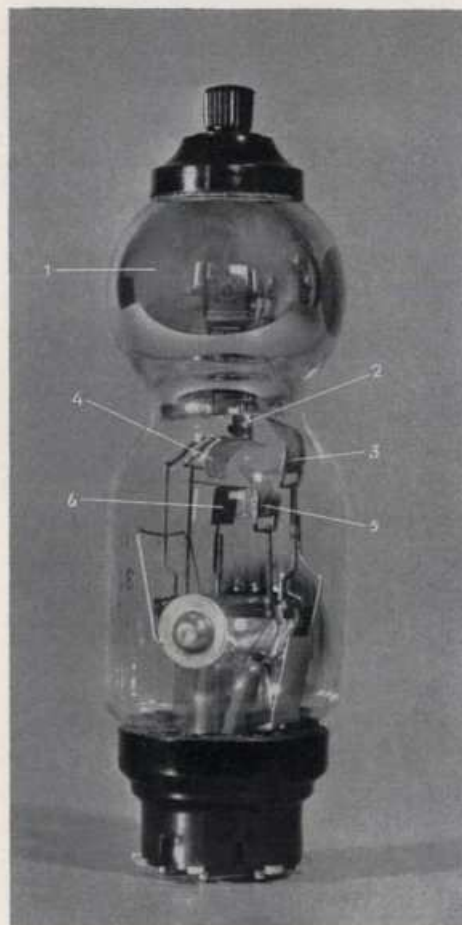


Fig. 4. Fotocel met versterking door secundaire emissie. 1 Inwendige metallisering, waarop de foto-electrisch gevoelige laag is aangebracht; 2 eerste anode; 3, 4, 5, secundair emitterende hulpelectroden; 6 eindanode. De stroom naar de eindanode is ongeveer 100 maal zoo groot als de fotostroom en bedraagt 2 à 3 mA/lm.

⁵⁾ Zie het in noot ³⁾ aangehaalde artikel, blz. 140.

De keuze van de spanningen

Wanneer men een groot aantal secundair emitterende elektroden op elkaar zou laten volgen, dan zou het voor de hand liggen om de spanning van één electrode tot de volgende telkens met eenzelfde waarde bijv. van 150 V te verhoogen. De spanning van de eerste anode moet proefondervindelijk dusdanig worden gekozen, dat electronen, welke door het gat in deze anode treden, zoo goed mogelijk op het eerste secundair emitterende plaatje van het versterkende systeem worden geconcentreerd. De spanning van de laatste anode moet hooger zijn dan die van alle andere elektroden, maar is verder van weinig belang.

In ons geval van slechts drie secundair emitterende trappen ontstaat een zoo kort systeem, dat de eerste en de laatste electrode de veldverdeling over het geheele systeem beïnvloeden, zoodat de op elkaar volgende trappen van versterking door secundaire emissie niet volkomen identiek zijn. De meest gunstige keuze van de spanningen blijkt dan ook iets anders te zijn dan volgens een rekenkundige reeks en moet proefondervindelijk worden bepaald. Men kan dit gemakkelijk doen door de verschillende elektroden aan te sluiten op een potentiometer en de instelling daarvan te wijzigen, totdat bij constante totale spanning en constante belichting van de fotocel de maximale stroom wordt verkregen. De optimale onderlinge verhouding der spanningen, die op deze wijze wordt gevonden, blijkt onafhankelijk te zijn van de totale spanning; deze laatste bepaalt alleen de versterking. Bij een totale spanning van 635 V werd als gunstigste spanningsverdeling de in *tabel I* aangegeven reeks van spanningswaarden gevonden.

De verkregen gevoeligheid bedraagt onder de aangegeven voorwaarden 2 à 3 mA/lm, hetgeen betekent, dat lichtstroomen boven eenige tienden milli-

lumen voldoende zijn om met een enkele versterkertrap achter de fotocel te worden geregistreerd. De bij een geluidsfilm ter beschikking staande lichtstroomen bedragen maximaal ongeveer 20 millilumen. Deze leveren op de uitgangsweerstand van de fotocel met secundaire emissie voldoende groote spanningsvariatiën om de eindtrap van een sprekende-film-versterker vol te kunnen uitsturen. Gebruikt men fotocellen zonder versterking of met versterking door gas, dan is dit niet mogelijk, maar moet men vóórversterking toepassen en wel voor met gas gevulde fotocellen één trap, voor vacuumfocellen twee trappen.

Behoudens dit constructieve voordeel levert de fotocel met secundaire emissie, zooals reeds opgemerkt werd, ook voordeelen op voor de kwaliteit der weergave. Bij de weergave van Philips-Miller-film, waarvan het geluidspoor zelf een zeer hooge kwaliteit bezit, zijn de verschillen tusschen de verschillende soorten fotocellen duidelijk te hooren: De secundair emitterende fotocel geeft practisch geen aanleiding tot vervorming en tot ruischen. Bij gebruik van een met gas gevulde fotocel treedt een aanmerkelijke vervorming op en bovendien een verzwakking van de hooge tonen. Bij gebruik van de vacuumfocel is tengevolge van de groote benoodigde versterking het ruischen reeds in storende mate te hooren; de bijdrage van de eerste versterkertrap tot het ruischen is hierbij grooter dan die van de fotocel.

Tabel I

fotokathode	0
eerste anode	25 V
eerste sec. electrode	300 V
tweede sec. electrode	450 V
derde sec. electrode	580 V
laatste anode	635 V

RÖNTGENOPNAMEN MET DE CAMERA

door A. BOUWERS en G. C. E. BURGER.

778.33:771.3

Terwijl bij de gebruikelijke methode van röntgenfotografie de film tegen een in de röntgen-schaduwkegel geplaatst fluoresceerend scherm wordt gedrukt (contact-foto), is er voor eenige tijd een andere methode uitgewerkt, waarbij het op een fluorescentiescherm oplichtende röntgenbeeld met behulp van een camera wordt gefotografeerd. Aangezien bij deze methode de kosten van een foto zeer sterk verminderd zijn en de verkregen beelden in kwaliteit niet onderdoen voor een normaal doorlichtingsbeeld, is de methode zeer geschikt om voor het tuberculose-serie-onderzoek te worden toegepast. De te bereiken beeldkwaliteit van de camera-foto wordt in dit artikel vergeleken met die van de contact-foto, en er worden proeven besproken, waarmee de praktische bruikbaarheid der röntgen-camera-fotografie is getoetst. Tenslotte wordt de bij de Medische Afdeling van Philips gebruikte opstelling beschreven en kort op het vraagstuk van het stralengevaar ingegaan.

In het medisch röntgenonderzoek zijn sinds lange tijd twee methoden naast elkaar in gebruik: het doorlichten, waarbij het röntgenschaduwbeeld van de patient wordt waargenomen op een fluorescentiescherm, en de röntgenfotografie, waarbij het röntgenbeeld wordt vastgelegd op een film, die tegen het fluoresceerend scherm wordt gedrukt. Op de foto zijn in het algemeen fijnere details te onderscheiden dan in het doorlichtingsbeeld, zoodat de medicus aan de hand van de foto een scherpere diagnose kan stellen. Soms echter, met name bij het massa-onderzoek van bevolkingsgroepen voor het opsporen van tuberculeuze longafwijkingen, gaat het niet zoozeer om het nauwkeurig omschrijven van een afwijking dan wel om het constateren van haar aanwezigheid. Hier kon men zich dus tevreden stellen met het doorlichten, hetgeen trouwens ook zeer gewenscht was, aangezien de op de beschreven wijze gemaakte longfoto's door de groote afmetingen der vereischte films — normaal 30×40 cm — vrij duur worden. Bovendien biedt het doorlichten bij het genoemde opsporingswerk het voordeel, dat de arts, door den patient een weinig in de vaststaande röntgenbundel te draaien, de eventueel aanwezige ziektehaarden op verschillende wijzen tusschen de skeletschaduw in het beeld kan projecteeren en daardoor minder kans loopt om achter skeletdeelen verscholen afwijkingen over het hoofd te zien. Om bij de fotografische methode dezelfde zekerheid te verkrijgen, zouden van elke persoon twee of drie foto's in verschillende richtingen genomen moeten worden, waardoor het bezwaar der hoge kosten nog zwaarder zou wegen.

Zoo beperkte men zich dan bij het tuberculose-serie-onderzoek tot het doorlichten, daarbij afstand doende van de voordeelen, die een fotografische methode overigens biedt, wat betreft het verkrijgen van een objectieve documentatie, de mo-

gelijkheid om een ziektegeval door verschillende artsen te laten beoordeelen, enz.

In de laatste jaren is nu een andere fotografische methode uitgewerkt¹⁾, welke het mogelijk maakt ook bij het opsporingswerk van de genoemde voordeelen (documentatie, enz.) te profiteeren. Bij deze methode, de zg. röntgen-camera-fotografie, wordt de film niet ter plaatse van het röntgenschaduwbeeld gebracht, maar wordt het op het fluorescentiescherm oplichtende beeld met behulp van één der gebruikelijke miniatuur-camera's gefotografeerd, bijv. op $2,4 \times 3,2$ cm. De kosten van het foto-materiaal, het ontwikkelwerk, de archiefruimte, enz. worden hierdoor enorm gereduceerd en beteekenen practisch geen bezwaar meer. Door de Medische Afdeling van Philips wordt deze methode dan ook sedert eenige tijd op groote schaal bij het tuberculose-serie-onderzoek toegepast.

Het principe der methode is allermintst nieuw. Reeds kort na de ontdekking der röntgenstralen heeft men getracht dit principe toe te passen, en van meet af aan heeft het de grondslag gevormd voor alle proefnemingen op het gebied der röntgen-cinematografie van hart en longen. Dat de methode toen geen uitgebreider toepassing kon vinden, was te wijten aan de onmogelijkheid om er met de toenmalige hulpmiddelen een bevredigende beeldkwaliteit mee te verkrijgen. De kwaliteit van een röntgenbeeld hangt af van de gemiddelde zwarting en van de scherppte. Nu blijkt echter, zooals we straks nog verder zullen uiteenzetten, dat het opvoeren van de scherppte steeds ten koste gaat van de zwarting, en omgekeerd. Leidde het aldus opgedrongen compromis bij de gewone röntgenfotografie (de „contact-foto”) tot bruikbare resultaten, bij de röntgen-camera-fotografie zijn wegens het lichtverlies bij de fotografische afbeelding

¹⁾ M. de Abreu, Z. Tuberculose 80, 70, 1938.

de voorwaarden voor het compromis veel ongunstiger, zoodat eerst de zeer lichtsterke, scherp tekenende optieken en de gevoelige, fijnkorrelige films, die in de laatste jaren ten behoeve van de miniatuur-fotografie ontwikkeld zijn, alsmede de sterk verbeterde fluorescentieschermen, de röntgen-camera-fotografie practisch mogelijk hebben gemaakt.

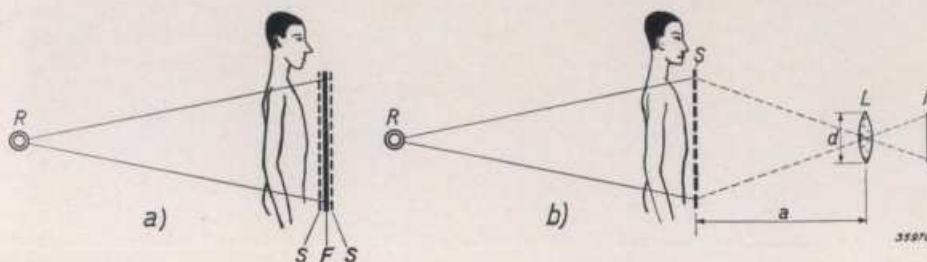


Fig. 1. Schema van de situatie bij het maken van een röntgen-contact-foto (a) resp. camera-foto (b). R röntgenstralenbron (brandvlek), S fluoresceerende folie resp. scherm, F film, L lens.

We willen de hier aangestipte overwegingen wat nader uitwerken door een vergelijking van de opname-condities voor de camera-foto en de contact-foto. In fig. 1 is de situatie bij de opname voor beide gevallen schetsmatig voorgesteld. Voor de contact-foto wordt een aan weerskanten met emulsie begoten film gebruikt, waar aan weerskanten fluoresceerende schermen (folies) tegen aan worden gedrukt. Bij de camera-foto wordt het fluorescentiebeeld door een op de afstand a opgestelde lens met diameter d en brandpuntafstand f op de film afgebeeld. Terwijl in het eerste geval de helft van de lichtuitstraling van elk der twee fluorescentieschermen, of anders gezegd: de totale straling van één scherm, tot de zwarting van de film bijdraagt, is in het tweede geval slechts de fractie, opgevangen door de lens, werkzaam. Deze fractie is:

$$k = \frac{\pi d^2/4}{4\pi a^2} = \frac{d^2}{16a^2}.$$

Voor de te verkrijgen gemiddelde zwarting is de lighthoeveelheid per cm^2 filmpoppervlak doorslaggevend, en aangezien de camera-foto in de verhouding a/f verkleind is ²⁾, zou voor het verkrijgen van een zelfde zwarting op de camera-foto een n maal zoo groote totale lichtuitstraling noodig zijn dan voor de contact-foto, waarbij

$$n = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{f}{a}\right)^2 = 16 \left(\frac{f}{d}\right)^2 \dots (1)$$

Rekenen we met een openingsverhouding der lens

²⁾ Strikt genomen is de verhouding $a/f=1$, echter is $a/f \gg 1$, zoodat we de verkleining gelijk a/f kunnen stellen.

van $d/f = 1 : 1,5$ — dit is tegenwoordig ongeveer het practisch bereikbare maximum —, dan is volgens (1) voor de camera-foto 36 maal zooveel licht noodig als voor de contact-foto ³⁾.

Welke consequenties heeft dit nu voor de scherpte? Bij de contact-foto zijn er drie bijdragen tot de onscherpte U van het beeld: de bewegings- onscherpte U_b , veroorzaakt door de harts slag, de

meetkundige onscherpte U_g (halfschaduwbreedte), veroorzaakt door de eindige afmetingen van de röntgenstralenbron (de brandvlek), en de folie- onscherpte U_f , welke te wijten is aan de korreligheid en de eindige dikte der fluorescentiefolie. De totale onscherpte is

$$U = U_b + U_g + U_f \dots (2)$$

U_b is evenredig met de belichtingstijd, U_g met de breedte van de brandvlek, U_f — naar proefnemingen hebben aangetoond ⁴⁾ — met de lichtopbrengst der folie. Deze zelfde drie grootheden: belichtingstijd, breedte van de brandvlek, lichtopbrengst, bepalen nu ook de totale hoeveelheid I van het fluorescentielicht, en wel is I met elk van de drie evenredig, dus:

$$I \sim U_b \cdot U_g \cdot U_f \dots (3)$$

Nu kan men gemakkelijk inzien, dat bij gegeven product van drie variabele grootheden hun

³⁾ Bij deze vereenvoudigde voorstelling van zaken is o.a. nog geen rekening gehouden met de lichtabsorptie in de lens, die juist bij lenzen met groote openingsverhouding vrij groot kan zijn; bij de door ons gebruikte lenzen bedroeg zij ongeveer 30%. Dit lichtverlies wordt gedeeltelijk weer door andere effecten gecompenseerd. Al met al zal de hier genoemde verhouding 36 vrij dicht bij de werkelijkheid zijn. Maar al zou de verhouding bijv. nog een factor 2 mis zijn, uit de volgende beschouwingen blijkt, dat dit slechts geringe invloed heeft op het eindresultaat.

⁴⁾ Zie A. Bouwers en W. J. Oosterkamp, Fortschr. Röntgenstr. 54, 87, 1936. Bij de beschouwingen is ondersteld, dat de belichtingstijd klein is ten opzichte van de periode van de harts slag, zoodat de bewegingssnelheid der deeltjes in de long tijdens de belichting vrijwel constant is, en dat een röntgenbuis met roterende anode wordt gebruikt. Bij stilstaande anode hangt de toelaatbare specifieke brandvlekbelasting nog van de belastingstijd af, zoodat een ingewikkelder formule in de plaats van (3) treedt.

som zoo klein mogelijk wordt, indien alle drie gelijk zijn. De opname-condities voor de foto (belichtingstijd, grootte van de brandvlek, soort van de fluorescentiefolie) kiest men dus het best zoodanig, dat

$$U_b = U_g = U_f, \dots \dots (4)$$

aangezien hierbij de totale onscherpte U het kleinst is. Deze wordt nu

$$U \sim \sqrt[3]{I} \dots \dots \dots (5)$$

en men ziet dus, dat de onscherpte van de camera-foto $\sqrt[3]{n}$ maal zoo groot zou worden als die van de contact-foto, waarbij n door verg. (1) gegeven is.

Met de genoemde waarde van d/f wordt $\sqrt[3]{n} = 3,3$. Aan een onscherpte van bijv. 1 mm in de contact-foto zou dus in de camera-foto, wanneer we deze weer tot dezelfde afmetingen vergrooten, een onscherpte van 3,3 mm beantwoorden.

De verhouding kan echter nog gunstiger worden gemaakt. We zijn hierboven nl. van de onderstelling uitgegaan, dat de camera-foto dezelfde gemiddelde zwarting moet krijgen als de contact-foto. In werkelijkheid heeft het echter geen zin om bij de camera-foto naar dezelfde zwarting te streven, aangezien deze in het algemeen bekeken wordt door haar op ongeveer levensgrootte te projecteren en voor de projectie de beelden „dunner” moeten zijn. Daarmee wordt de noodige lichthoeveelheid I en volgens (5) ook de onscherpte kleiner. Verder hebben de miniatuur-films in het algemeen een steilere gradatie dan de groote röntgenfilms, zoodat met hardere (flauwere beelden gevende) röntgenstralen, dwz. met hogere spanningen op de röntgenbuis

gewerkt mag worden. Aangezien het rendement der röntgenstralenopwekking hierbij aanzienlijk stijgt, is voor eenzelfde röntgenintensiteit een kleinere brandvlek voldoende en de meetkundige onscherpte wordt dus kleiner. Bovendien is het, wanneer de beeldkwaliteit toch overwegend door de onscherpte wordt bepaald, aan te bevelen om de onscherpte nog te reduceeren door op andere punten iets prijs te geven, dus bijv. de buisspanning nog iets meer te verhoogen en daarvoor met een kleiner contrast genoegen te nemen. Zoo wordt de meetkundige onscherpte nog verder verkleind. Eenzelfde effect verkrijgt men door verkleinen van de afstand b tusschen de brandvlek en het fluoresceerend scherm: voor eenzelfde röntgenintensiteit moet men de brandvlekbreedte $h \sim b^2$ kiezen, en aangezien de halfschaduwbreedte evenredig met h/b is, neemt deze voor constante intensiteit evenredig met b af. Weliswaar moet hierbij een grotere vertekening van het schaduwbeeld op de koop toe worden genomen. Tenslotte is het ook nuttig om de belichtingstijd wat langer te kiezen, dan aan de voorwaarde (4) zou beantwoorden. Daardoor worden de onscherpten U_g en U_f , die over de geheele foto constant zijn, iets verminderd ten koste van een grotere bewegingsonscherpte U_b , welke echter in hoofdzaak beperkt is tot de omgeving van het hart en de groote bloedvaten. In de overige gedeelten van de long, waar het vaakst afwijkingen optreden, wordt zoodoende iets aan scherpte gewonnen.

Bij de camera-foto's, die in het serie-onderzoek bij Philips worden genomen, is de voor de contact-foto gebruikelijke buisspanning van 50-70 kV verhoogd tot 80-95 kV (de meerdere strooistralen, die hierbij

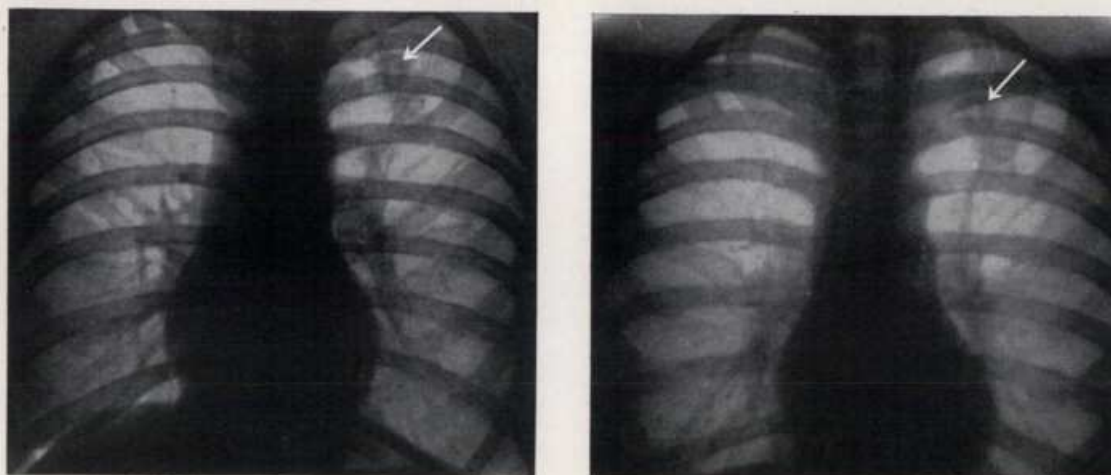


Fig. 2. Links verkleinde contact-foto, rechts vergroote camera-foto van de long van eenzelfde patient. Onder het linker sleutelbeen (zie pijl) is een kleine ringschaduw aanwezig, die op een actief tuberculeus proces wijst. Deze schaduw, alsmede de in de long verlopende bloedvaten, zijn ook op de camera-foto zeer duidelijk te zien.

ontstaan en die aanleiding zouden geven tot een ongewenste sluiering van de foto, worden door een dun strooistralenraster onschadelijk gemaakt); de afstand b is verlaagd van 150 tot 85 cm, en de opnametijd is 0,4-0,6 sec in plaats van ca 0,1 sec. Hiermee is de vergroting der resulterende onscherpte in de camera-foto teruggebracht tot een factor 2. Om een indruk te geven van de goede beeldkwaliteit, die op deze wijze nog verkregen wordt, zijn in fig. 2 naast elkaar weergegeven een vergroting van een camera-foto, zooals er in ons bedrijf reeds duizenden gemaakt zijn, en een verkleining van een contact-foto van dezelfde patient.

Van twee verdere oorzaken van onscherpte, die bij de camera-foto optreden, hebben we nog gezweigd: de korreligheid van de film en de onscherpte van de lens, dwz. de grootte van de aberratiecirkel, waarin een punt wordt afgebeeld. Ook hier hebben we weer het antagonisme tusschen zwarting en scherpte. De filmkorrel is groter bij grotere gevoeligheid, en de aberratiecirkel eener lens neemt toe met haar openingsverhouding. Door de groote vooruitgang der miniatuur-fotografie is men nu echter zoover, dat bij de door ons gebruikte film met een gevoeligheid van ca 17/10 DIN en bij een lens met $d/f = 1:1.5$ de onscherpten nog klein zijn vergeleken bij de onscherpte door de hierboven besproken oorzaken. Bij de films vonden we een korrel, variërende van 5 tot hoogstens 25 micron, bij onze lens een aberratie-cirkel van 20-30 μ in het midden van het beeld (aan de rand is deze iets groter). De onscherpte U echter kan in het op normale afmetingen gebrachte beeld ca 2 mm, in het ongeveer 13 maal verkleinde beeld dus ca 150 μ bedragen.

We willen hier in het midden laten, of de röntgen-camera-foto, die volgens het bovenstaande in kwaliteit niet meer veel achterstaat bij de contact-foto, deze laatste op den duur zal kunnen vervangen. Wel echter leidt de hier uitgevoerde vergelijking tot de conclusie, dat de camera-fotografie zeker in de plaats kan treden van het bij het opsporings-onderzoek gebruikelijke doorlichten, waarbij immers minder hoge eischen aan de waarneming van details mogen worden gesteld. Alvorens echter tot het invoeren der methode in het serie-onderzoek over te gaan, hebben we haar bruikbaarheid in de practijk nog getoetst door de volgende proefnemingen⁵⁾.

In de eerste plaats werd op een reeds eerder in dit tijdschrift beschreven wijze⁶⁾ de grootte bepaald van het kleinste in het röntgenbeeld nog juist waarneembare object. De borst van de pa-

tient was bij deze proeven vervangen door een „fantom” van „Philite”, waarin als waar te nemen objecten holten van verschillende afmetin-

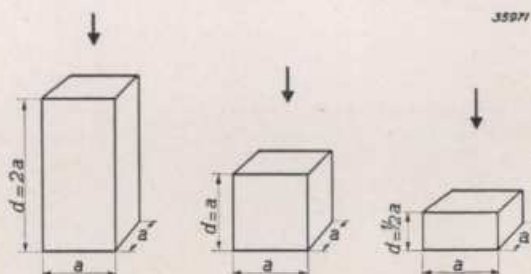


Fig. 3. Vorm der drie objecten, die gebruikt zijn voor de zichtbaarheidsproeven met fantomen. De pijl geeft de richting der röntgenstralen aan.

gen waren aangebracht. Aangezien de zichtbaarheid toeneemt met het contrast, dat op zijn beurt weer afhangt van de dikte van het object (afmeting in de richting der röntgenstralen) zijn de proeven steeds met drie soorten objecten, van de in fig. 3 geschetste vorm, gedaan. Zet men de voor het zichtbaar zijn vereischte minimale dikte van het object als functie van de breedte uit, dan krijgt men de in fig. 4 weergegeven krommen. Fig. 4a heeft betrekking op een normaal fantoom, fig. 4b op een fantoom, waarin bijzonder veel gestrooide röntgenstralen ontstonden en dat derhalve de bij dikkere patienten gegeven omstandigheden nabootst. Uit de krommen blijkt, dat op de camera-foto doorgaans kleinere objecten kunnen worden waargenomen dan bij het doorlichten, en dat het verschil ten gunste van de röntgen-camera-fotografie vooral zeer uitgesproken is bij dikkere patienten.

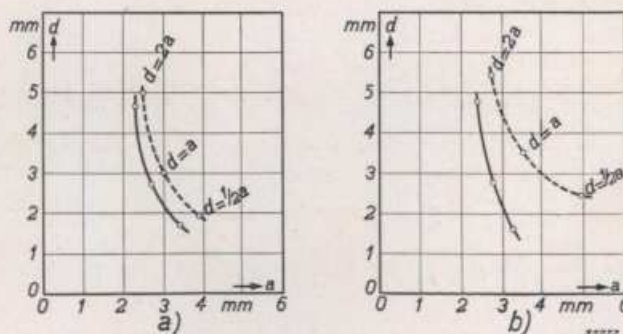


Fig. 4. Het kleinste in een fantoom waarneembare object in het doorlichtingsbeeld (gestippelde krommen) en op de camera-foto (getrokken krommen). Uitgezet is de voor de waarneming minstens vereischte dikte d als functie van de breedte a . De meetpunten slaan op de drie soorten objecten van fig. 3.

- Fantom, overeenkomende met normale patient. Voor het doorlichten is de normale buisspanning van 54 kV gebruikt.
- Fantom, overeenkomende met dikke patient. Wegens de grootte hoeveelheid strooistralen is hier zoowel bij het doorlichten als voor de camera-foto een zg. strooistralenraster (Lysholm-filter) toegepast. Bovendien werd bij het doorlichten de spanning verhoogd tot 70 kV.

⁵⁾ G. C. E. Burger, Handelingen 27e Ned. natuurk. en geneesk. Congres, blz. 194, 1939; Maandschr. Kinder-geneesk. 9, 187, 1939.

⁶⁾ B. van Dijk, Eenige problemen bij de röntgendoorlichting, Philips techn. T. 4, 119, 1939. Uitvoerder in: G. C. E. Burger en B. van Dijk, Fortsch. Röntgenstr. 54, 492, 1936; 55, 464, 1937; 58, 382, 1938.

Tabel I
Vergelijking van contact-foto (Co.), camera-foto (Ca.) en doorlichting (D.).

Categorie patienten	Aantal gevallen	Be-vredigende overeen-stemming van alle 3 methoden	D. geeft minder dan Co. en Ca.	D. en Ca. geven minder dan Co.	Ca. geeft minder dan Co. en D.	Verbetering door extra foto's
Groote afwijkingen	94	83	11	—	—	22
Geringe actieve afwijkingen	17	17	—	—	—	16
Kleine inactieve of geen afwijkingen	81	75	—	4	2	18

Als experimentum crucis diende tenslotte een vergelijking der diagnosen, welke door verschillende onafhankelijk van elkaar volgens de drie onderzoek-methoden werkende medici werden gesteld in een reeks van ca 200 gevallen. In *tabel I* zijn de resul-taten van deze vergelijking weergegeven, waarbij

de gevallen naar de belangrijkheid der in de longen gevonden afwijkingen in drie groepen gesplitst zijn. Slechts in twee gevallen van kleine, inactieve afwijkingen gaf de röntgen-camera-foto minder uitsluitsel dan de contact-foto en het doorlichten. In elf gevallen van groote afwijkingen leverde het

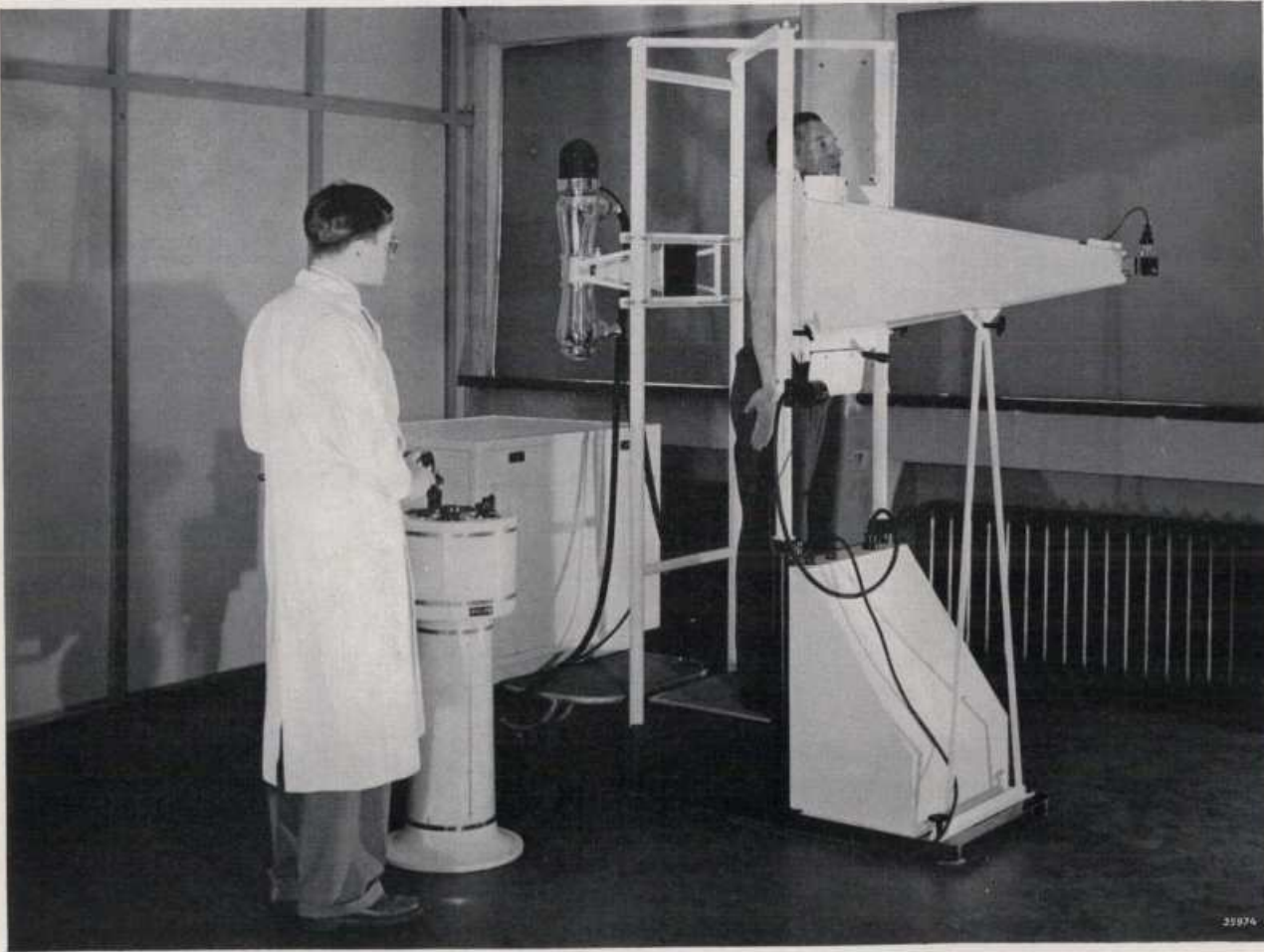


Fig. 5. Apparatuur voor het maken van röntgen-camera-foto's. In het midden de röntgen-buis in een geaarde omhulling (wanden, die alleen de taak hebben, verstrooide röntgen-stralen tegen te houden, zijn hier verwijderd). De patient staat op een in hoogte verstel-baar platform, met zijn borst tegen het fluoresceerende scherm, waarop lichtdicht een foto-tubus is aangesloten. Hierop is de camera gemonteerd (geheel rechts). In de kist links is de hoogspanningsgenerator ondergebracht, die van de daarvóór zichtbare lessenaar uit wordt bestuurd. De persoon, welke de opnamen maakt, behoeft alleen voor de juiste opstelling van den patient te zorgen en met behulp van een handschakelaar, die tevens het filmtransport bewerkstelligt, de röntgenbuis in te schakelen.

doorlichten minder volledige inlichtingen. Opge-merkt dient, dat de opnamen bij elken patient in drie verschillende richtingen werden gemaakt, nl. van achteren naar voren, van voren naar achteren, en schuin door het lichaam stralend. Uit de laatste kolom van de tabel, waarin is aangegeven, in hoe-veel gevallen de tweede en derde opname nog nieuwe gegevens aan het licht bracht, blijkt wel duidelijk het belang van deze maatregel. Bij het serie-onder-zoek bij Philips worden dan ook steeds minstens twee camera-foto's gemaakt.

De techniek van de opname der camera-foto's is zeer eenvoudig. De camera is aan het einde van een op het fluorescentiescherm aansluitende, licht-dichte foto-tubus gemonteerd (zie *fig. 5*) en is eens voor al scherp op het scherm ingesteld. Dit instellen werd met het fluorescentielicht zelf uitgevoerd, om onafhankelijk te zijn van eventuele chromatische afwijkingen der lens. De sluiters van de camera is overbodig en werd derhalve uit het toestel ver-wijderd, terwijl door een eenvoudig mechanisme het filmtransport gekoppeld is met de schakelaar, waarmee de röntgenbuis wordt bediend. In een kastje, dat men in *fig. 5* links boven op de foto-tubus ziet, wordt voor elke patient een kaart ge-stoken, waarop volgnummer, naam, datum en andere gegevens zijn vermeld. De kaart wordt op een hoek van de röntgenopname gefotografeerd, zoodat verwisselingen uitgesloten zijn.

Een kwestie, die we tenslotte nog willen aan-

raken, is het stralengevaar. De stralendosis, die de patient bij het maken van een camera-foto op de huid ontvangt, bedraagt 0,6-1,0 röntgen. Bij een doorlichting, die ongeveer 1 minuut duurt, is de dosis 2-3 r. Maakt men van de patient twee of drie opnamen, dan krijgt hij dus in totaal geen grotere dosis dan bij het doorlichten. (Deze dosis is wel aanzienlijk groter dan de tolerantiedosis van 0,2 r per dag, welke zonder schade voor de gezondheid mag worden toegelaten; daar het doorlichten resp. fotografeeren van elke patient echter slechts met maandenlange tusschenpoozen geschiedt, kan de genoemde dosis van 3 r hem geen enkel kwaad berokkenen). Voor het bedienend personeel is de situatie bij de fotografische methode veel gunstiger dan bij het doorlichten. Terwijl bij het doorlichten de onderzoekende arts nog eenige voorzichtigheid moet betrachten om vooral zijn handen niet teveel aan röntgenstralen bloot te stellen, kan bij de foto-grafische methode de persoon, die de opname maakt — het behoeft wel geen betoog, dat dit geen medicus behoeft te zijn — zich volkomen tegen de straling beschermen door bij het belichten telkens op een behoorlijke afstand te gaan staan, eventueel achter een looden of loodglazen scherm. Bij de door ons gebruikte opstelling werd voor meerdere zekerheid nog een met lood bekleede draaideur aan-gebracht (in *fig. 5* was deze verwijderd). Is deze niet gesloten, dan kan de röntgenbuis niet worden ingeschakeld.

EEN TOONGENERATOR

door L. BLOK.

534.42 : 621.396.615.11

De toongenerator GM 2307, die voor het onderzoek van luidsprekers, versterkers, kabels enz. kan worden gebruikt, is gebouwd volgens het heterodyne-principe. Het gewenschte laagfrequente signaal wordt verkregen, door twee trillingen van hogere frequenties, waarvan er één regelbaar is, toe te voeren aan een mengbuis. De keuze der frequenties wordt besproken en er wordt uiteengezet, hoe te werk is gegaan om de frequentie karakteristiek vlak en de vervorming van het laagfrequente signaal klein te maken. Het resultaat is een vrijwel vlakke karakteristiek van 30 tot 16 000 per/sec en een vervorming van gemiddeld 0,4% bij een vermogen van ruim 200 mW. Ten koste van wat meer vervorming kan het vermogen nog opgevoerd worden, tot maximaal 1000 mW. Door doelmatige rangschikking der onderdelen is het verlopen der frequentie tengevolge van temperatuurschommelingen zeer sterk beperkt; bij het opwarmen verloopt de generator in totaal slechts ca 20 per/sec. Het verlopen van het nulpunt der frequentieschaal kan op eenvoudige wijze gecorrigeerd worden, hetgeen door middel van een kathodestraal-indicator wordt gecontroleerd. De invloed van netspanningsschommelingen op de grootte van de uitgangsspanning is door een compensatieschakeling zeer klein gemaakt. Tenslotte worden de verschillende wijzen van toepassing van de toongenerator besproken.

Voor het meten van de frequentiekarakteristiek en de distorsiefactor van electro-acoustische installaties of van onderdelen daarvan, zooals versterkers, filters, kabels, luidsprekers, moet men beschikken over een toestel, dat een zuiver sinusvormige spanning levert met een over het geheele acoustische frequentiegebied variabele frequentie. Een dergelijk toestel, een zg. toongenerator, kan in principe op zeer verschillende wijzen verwezenlijkt worden. Men kan bijv. een trilling met de gewenschte frequentie langs mechanische weg opwekken en door een electrodynamisch systeem in een wisselspanning omzetten. Voorbeelden hiervan zijn de elektrische stemvork, die veelal voor ijkingen wordt gebruikt, en een eenige tijd geleden in dit tijdschrift beschreven toongenerator¹⁾, waarbij de trilling opgewekt werd met behulp van een afgestemde snaar.

Het gebied, waarin de frequentie gevarieerd kan worden, is bij dergelijke mechanische oscillatoren practisch steeds zeer beperkt, zoodat men voor het bestrijken van het geheele acoustisch belangrijke gebied, d.i. ongeveer 30 - 16 000 per/sec, een heele reeks van oscillatoren zou moeten gebruiken. In dit opzicht heeft men het gemakkelijker, wanneer men de gewenschte trilling met een sirene opwekt. Met een, eveneens reeds eerder beschreven²⁾, optische uitvoering hiervan kan men sinusvormige trillingen voortbrengen, waarvan de frequentie door regeling van het toerental van de aandrijvende

motor in wijde grenzen kan worden gevarieerd. Een dergelijke opstelling komt echter niet in aanmerking voor metingen op technische schaal, waarbij een gemakkelijk te hanteeren en te verplaatsen apparaat gewenscht is.

Tot bruikbare oplossingen van het probleem komt men, wanneer men de trillingen opwekt langs elektrische weg, met behulp van afgestemde *L-C*-kringen. Maar ook hier is de meest voor de hand liggende weg, nl. de *L-C*-kring van een oscillator rechtstreeks op de gewenschte frequentie ($f = 1/2\pi\sqrt{LC}$) af te stemmen, practisch niet bruikbaar, aangezien dan voor de laagste frequenties zeer groote condensatoren en spoelen noodig zouden zijn, terwijl men voor het bestrijken van het geheele, 9 octaven omvattende, frequentiegebied weer achtereenvolgens een heele reeks trillingskringen zou moeten gebruiken. Men vermijdt beide bezwaren, wanneer men het heterodyne-principe toepast. De trilling met de gewenschte frequentie f wordt dan verkregen als een zweving van twee veel hogere frequenties f_1 en f_2 . De beide oscillatoren voor het voortbrengen dezer hoge frequenties vereischen slechts kleine waarden van C en L , welke bovendien procentueel slechts weinig behoeven te worden veranderd om de gewenschte variatie van de verschilfrequentie f te bewerkstelligen. Volgens dit principe is dan ook de Philips toongenerator GM 2307 gebouwd, die we in hetgeen volgt willen beschrijven. Vooropgesteld zij daarbij, dat bij de constructie van dit toestel niet getracht werd, aan de extreme eischen te voldoen, die voorsommige metingen in het laboratorium kunnen worden gesteld, maar dat het er in de eerste plaats om ging een eenvoudig, transportabel apparaat te verkrijgen,

¹⁾ Balth. van der Pol en C. C. J. Addink, De stemming van muziekinstrumenten en orkesten, Philips techn. T. 4, 217, 1939.

²⁾ J. F. Schouten, Synthetisch geluid, Philips techn. T. 4, 176, 1939.

dat handig in het gebruik is, een redelijke meetnauwkeurigheid veroorlooft en aan zeer uiteenlopende toepassingscondities kan worden aangepast.

Verwezenlijking van het heterodyne-principe

In fig. 1 is de samenstelling van het toestel schematisch weergegeven. De twee generatoren G_1 en G_2 leveren de signalen met de uitgangsfrequenties f_1 , resp. f_2 . De zweving met de verschilfrequentie $f = |f_1 - f_2|$ wordt op dezelfde wijze, als in radio-ontvangtoestellen volgens het superheterodyne-principe gebruikelijk is, verkregen door de twee signalen toe te voeren aan een mengbuis M . De anodestroom van de mengbuis bevat dan, behalve componenten met de frequenties f_1 , f_2 en harmonischen daarvan, ook componenten met de combinatiefrequenties $f_1 + f_2$ en $|f_1 - f_2|$ alsmede combinatiefrequenties van de harmonischen, dus $|mf_1 \pm nf_2|$. De combinatiefrequentie $|f_1 - f_2| = f$, waar het ons om begonnen is, wordt door het laagdoorlatend filter F uitgezeefd en door de versterker V op het gewenste niveau gebracht. De verschilfrequentie f kan geregeld worden door de frequentie f_2 van de generator G_2 te veranderen³⁾.

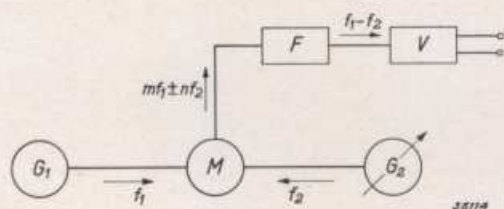


Fig. 1. Principeschema van de toongenerator. G_1 vaste, G_2 variabele oscillator, M mengbuis, F filter, V versterker.

Terwijl het maximale verschil der frequenties f_1 en f_2 voorgeschreven is door de bovenste grens van het gewenste frequentiegebied (16 000 per/sec), is de absolute grootte van f_1 en f_2 nog niet vastgelegd. Het voordeel van de toepassing van het heterodyne-principe, namelijk dat geen groote waarden en variaties van C en L vereischt zijn, wordt echter des te uitgesprokener, hoe hoger f_1 en f_2 worden gekozen. Er is nog een andere omstandigheid, die voor zoo hoog mogelijke waarde van deze frequenties pleit. Het filter F moet de signalen f_1 en f_2 , die veel sterker zijn dan het gewenste signaal $|f_1 - f_2|$, tot een verwaarloosbaar klein bedrag verzwakken; dit is des te gemakkelijker te verkrijgen, naarmate de hoogste nog te gebruiken frequentie $f_{\max}$ en de frequenties f_1 , f_2 verder uit elkaar lig-

gen, dus hoe hoger f_1 en f_2 gemaakt worden. Ook de combinatiefrequenties van de harmonischen, bijv. $|f_1 - 2f_2|$, $|2f_1 - 3f_2|$, enz. komen, zooals in fig. 2 is verduidelijkt, verder van $f_{\max}$ af te liggen naarmate f_1 en f_2 hoger gekozen zijn (de combinatiefrequenties $|2f_1 - 2f_2|$, $|3f_1 - 3f_2|$, enz. verschuiven daarbij natuurlijk niet).

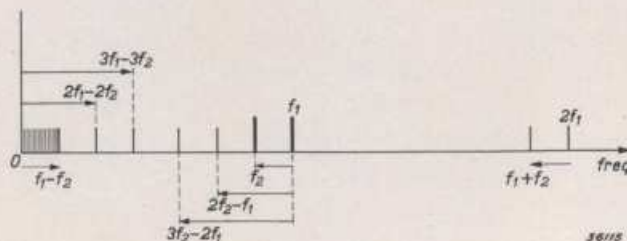


Fig. 2. Liggings der oorspronkelijke frequenties f_1 en f_2 en der ontstaande combinatiefrequenties $|mf_1 \pm nf_2|$.

Anderzijds mag men de frequenties f_1 , f_2 niet willekeurig hoog maken. Men moet nl. eischen, dat de voor het regelen van f vereischte procentuele variaties van de oscillator-elementen nog groot zijn ten opzichte van de onvermijdelijke kleine variaties tengevolge van de temperatuurschommelingen enz., omdat anders de ingestelde frequentie f sterk zou kunnen verlopen, hetgeen natuurlijk ongewenscht is. Bij oscillatorfrequenties f_1 , f_2 van de orde van grootte van 100 000 per/sec kan het verlopen der frequentie nog betrekkelijk gemakkelijk in de toelaatbare grenzen worden gehouden, terwijl hierbij ook de constructie van het filter nog geen bijzondere moeilijkheden biedt.

Voor het instellen van de frequentie nul moeten de twee oscillatoren gelijke frequentie hebben, $f_1 = f_2$. Stel nu, dat men f_2 variabel wil maken; moet de verschilfrequentie f dan verkregen worden door verhoogen dan wel verlagen van f_2 ? Op het eerste gezicht lijkt dit geheel willekeurig, het gezichtspunt van het verlopen der frequentie levert echter een ondubbelzinnige beslissing. Het afstemmen van f_2 geschiedt practisch met behulp van een aan een vaste condensator parallel geschakelde draaicondensator. Deze laatste, die in het algemeen nogal gevoelig is voor schommelingen in het vochtgehalte der lucht enz., draagt in belangrijke mate bij tot de ongewenschte capaciteitsvariatie, en wel is deze grooter, naarmate de draaicondensator op een grootere capaciteit is ingesteld. Nu is een bepaalde capaciteitsvariatie procentueel het sterkst merkbaar bij lage verschilfrequentie f . Het is dus gunstig om het apparaat zoo in te richten, dat voor de laagste frequenties f de draaicondensator van G_2 op de kleinste capaciteit staat, dwz. dat de verschilfrequentie f verhoogd wordt door vergroo-

³⁾ Terwijl bij radio-ontvangtoestellen de frequentie van de locale oscillator zoo wordt veranderd, dat de als zweving met het opgevangen signaal verkregen „middenfrequentie” constant is, wordt hier dus juist de „middenfrequentie” gevarieerd.

ten van de capaciteit, dus door verlagen van de frequentie f_2 van de verstembare generator G_2 .

Op grond van de bovenstaande overwegingen is voor de toongenerator GM 2307 een frequentie $f_1 = 100\,000$ per/sec voor de vaste oscillator gekozen, terwijl de frequentie f_2 van de variabele oscillator tussen 85 000 en 100 000 per/sec kan worden gevarieerd. Bovendien is ook de „vaste” oscillator niet geheel vast, maar kan zijn frequentie van 100 000 tot 101 000 per/sec worden opgevoerd. Hierdoor wordt een fijne regeling van de frequentie f mogelijk gemaakt. De beide condensatorschalen zijn rechtstreeks in per/sec geijkt, de frequentie f vindt men door optellen van de aanwijzingen der beide schalen; de maximale waarde van f is dus $15\,000 + 1\,000 = 16\,000$ per/sec⁴⁾.

Vervorming en frequentie karakteristiek van de toongenerator

Om de distorsiefactor van een of ander transmissie-element te meten, moet de hieraan toegevoerde ingangsspanning, d.i. de uitgangsspanning van de toongenerator, zoo goed mogelijk vrij van vervorming zijn. Verder is het voor het opnemen van frequentie karakteristieken gewenscht, dat de toongenerator voor alle frequenties dezelfde uitgangsspanning levert, dwz. zelf een vlakke frequentie karakteristiek heeft. Om duidelijk te maken, hoe bij de hier beschreven toongenerator aan deze eischen is voldaan, willen we het proces van het „mengen” der frequenties f_1 en f_2 nog wat nader bezien.

Hebben de aan de twee stuurroosters der mengbuis toegevoerde wisselspanningen met de frequenties f_1 , f_2 de amplituden V_1 resp. V_2 , dan kan de amplitude van de verkregen anodewisselstroom met de verschilfrequentie $f_1 - f_2$ geschreven worden als:

$$I = S_c \cdot V_1, \dots \dots \dots (1)$$

waarbij de zg. conversiesteilheid S_c afhangt van V_2 . De spanning V_1 van de vaste oscillator is constant, de spanning V_2 van de variabele oscillator verandert echter min of meer met de ingestelde frequentie, zoodat ook S_c en daarmee I met de frequentie zou varieren. Nu blijkt bij de hier gebruikte mengbuis

(de triode-hexode ECH3) voor spanningen V_2 van de orde van grootte van 25 volt op het derde rooster de conversiesteilheid slechts zeer weinig met V_2 te veranderen. In dit spanningsgebied is derhalve V_2 gelegd.

Wat nu de vervorming betreft, moet men er voor zorgen, dat de frequenties $2f_1 - 2f_2 = 2f$ en $3f_1 - 3f_2 = 3f$ enz., die nog in het doorlaatgebied van het achter de mengbuis geschakelde filter (F in fig. 1) kunnen vallen, in de anodestroom der mengbuis slechts zeer zwak zijn vertegenwoordigd. Voor het ontstaan dezer frequenties zijn in hoofdzaak twee oorzaken aan te wijzen:

- 1) zij worden door de mengbuis gevormd als verschilfrequenties der in de toegevoerde roosterwisselspanningen reeds aanwezige harmonischen;
- 2) zij worden door de mengbuis gevormd als hogere combinatiefrequenties ($m f_1 \pm n f_2$) der roosterwisselspanningen, ook wanneer deze zuiver sinusvormig zijn.

Het is duidelijk, dat het voor het vermijden van het eerstgenoemde effect voldoende is, wanneer slechts één der beide roosterwisselspanningen zoo weinig mogelijk harmonischen levert. Het tweede effect wordt tegengegaan door de roosterspanning V_1 klein te maken ten opzichte van de spanning V_2 . Beide eischen zijn verwezenlijkt door achter de vaste oscillator G_1 een laagdoorlatend filter F_1 te schakelen, zie fig. 3. Hierin worden de harmonischen van f_1 geëlimineerd en tevens het signaal tot het gewenschte lage niveau, ca 0,1 volt, teruggebracht. Natuurlijk had men ook zonder het filter aan beide eischen kunnen voldoen, door de oscillator G_1 slechts met zeer kleine amplitude te laten trillen, waarbij immers ook de vervorming klein wordt. In dat geval zou echter een andere oorzaak van vervorming merkbaar worden, nl. de terugwerking van de (zeer groote) wisselspanning V_2 op de oscillator G_1 , via de capaciteit tussen de

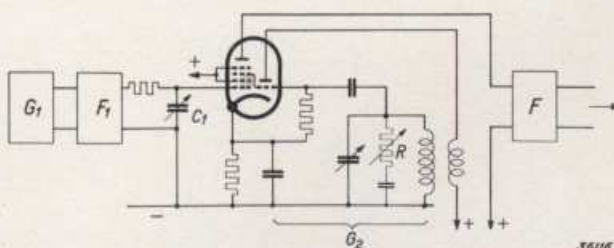


Fig. 3. Eenige details van de schakeling der oscillatoren G_1 , G_2 en der mengbuis. Het filter F_1 verwijdt de harmonischen uit het door G_1 geleverde signaal en verzwakt het in de gewenschte mate, daarbij tevens een terugwerking van G_2 op G_1 beletend. De condensator C_1 dient voor eventuele regeling van de vervorming en het vermogen van de toongenerator, de regelweerstand R voor een nulpuntscorrectie der frequentieschaal.

⁴⁾ Dat de fijne regeling verkregen wordt door verhooggen van f_1 , is wel in tegenspraak met het ontwikkelde principe, dat f verhoogd moet worden door verlagen der oscillatorfrequentie. De voor de fijne regeling van f_1 vereischte draaicapacitor in G_1 is echter veel kleiner dan die in de oscillator G_2 , het verloop van zijn capaciteit heeft derhalve ook veel minder invloed, terwijl we op deze wijze hebben bereikt, dat de aanwijzingen der beide schalen eenvoudig opgeteld mogen worden.

beide stuurroosters. Door het tusschengeschakelde filter, dat ook in omgekeerde richting verzwakkend werkt, is de terugwerking nu beperkt.

De laatste cel van het filter F_1 is in fig. 3 apart aangegeven. Zij bestaat uit een serieschakeling van een weerstand en een condensator C_1 . De spanning op deze laatste is de aan de mengbuis toegevoerde roosterwisselspanning V_1 . Het toestel is nu zoo ingericht, dat men de capaciteit van de condensator C_1 desgewenscht iets kan verkleinen, waardoor hierop een grotere fractie van de totale, op de serieschakeling staande spanning komt. V_1 wordt dan dus groter en men krijgt een grooter afgegeven vermogen, resp. bij bepaalde belastingsweerstand een grotere uitgangsspanning. Terwijl het vermogen van de toongenerator normaal ruim 200 mW bedraagt, kan het op deze wijze, wanneer dit voor speciale metingen noodig is, verhoogd worden tot 1000 mW. Weliswaar stijgt de vervorming daarbij van de normale waarde van 0,4% tot 1 à 2%. Omgekeerd kan men, wanneer de vervorming van 0,4% voor het beoogde doel nog te groot is, door vergroten van de capaciteit van C_1 de spanning V_1 verkleinen en daarmee de vervorming tot in het uiterste geval 0,25% reduceeren, waarbij weliswaar ook het vermogen van de toongenerator op 100 mW daalt. Veel verder zou men met het op deze wijze verkleinen van het vermogen in ieder geval niet mogen gaan, aangezien het door de mengbuis geleverde signaal voldoende ver moet blijven uitsteken boven het brom- en ruisniveau van de versterker.

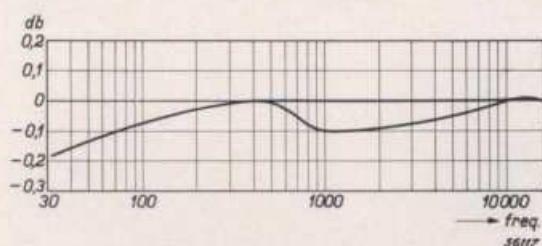


Fig. 4. Frequentiearakteristiek van de toongenerator.

De versterker V , die uit twee trappen bestaat, werkt met een sterke tegenkoppeling, waardoor een van de frequentie onafhankelijke versterkingsfactor verkregen wordt. Aangezien ook de grootte van het door de mengbuis geleverde signaal, zooals reeds werd vermeld, nagenoeg niet van de frequentie afhangt, is dus de frequentiearakteristiek van de toongenerator practisch geheel vlak (zie fig. 4). Door de tegenkoppeling wordt tevens de vervorming in de versterker klein gehouden. De gemiddelde getallen van de uiteindelijke vervorming hebben we reeds genoemd.

Het verloop van de frequentie

Hierboven werden reeds enkele maatregelen genoemd, die beoogden het verloop van de frequentie f zooveel mogelijk te beperken. We willen dit punt nog wat nader beschouwen. De belangrijkste oorzaak van een verloop der frequentie is het variëren van de temperatuur, met name tijdens het opwarmen na het inschakelen van de toongenerator, waarbij eerst na eenige uren een constante eindtemperatuur wordt bereikt. We kunnen de relatieve frequentieverandering, die een oscillator ondergaat bij een temperatuurverandering t , evenredig stellen met t en noemen de evenredigheidsfactor de temperatuurcoëfficiënt a van de oscillator. Bij de toongenerator is de verandering df van de gewenschte frequentie f gegeven door

$$df = df_1 - df_2,$$

$$\text{dus} \quad df = f_1 a_1 t_1 - f_2 a_2 t_2, \dots \quad (2)$$

waarbij a_1, t_1 en a_2, t_2 respectievelijk de temperatuurcoëfficiënten en de temperatuurvariëaties der twee oscillatoren met de frequenties f_1 en f_2 zijn. In het algemeen zullen a_1 en a_2 een zeker bedrag Δa verschillen, en evenzoo t_1 en t_2 een zeker bedrag Δt . Verg. (2) wordt dus

$$df = f_1 a_1 t_1 - (f_1 - f_2)(a_1 - \Delta a)(t_1 - \Delta t),$$

of, indien Δa en Δt voldoende klein zijn ten opzichte van a en t :

$$df = f a_1 t_1 + f_1 (a_1 \Delta t + t_1 \Delta a) \dots \quad (3)$$

De eerste term hiervan beteekent een absolute frequentievariatie, die toeneemt met de ingestelde toonfrequentie f . Om deze variatie te beperken, zal men de temperatuurcoëfficiënt en de temperatuurverhoging van beide oscillatoren zoo klein mogelijk trachten te maken. In fig. 5, waarin een foto van de geopende toongenerator is weergegeven, ziet men, welke maatregelen genomen zijn, om de temperatuurverhoging der oscillatoren te beperken. Het voedingsgedeelte (transformator, gelijkrichter, enz.), waarin de meeste warmte wordt ontwikkeld, is in een afgescheiden compartiment in de bovenste helft van het apparaat ondergebracht. De spoelen en condensatoren, die de frequenties der beide oscillatoren bepalen, bevinden zich rechts en links onder in de hoeken, welke betrekkelijk koel blijven, doordat hier steeds een stroom verse lucht door de ventilatiespleten van het huis van het toestel langs strijkt. Op deze wijze is de temperatuurverhoging der oscillatoren bij het opwarmen tot ca 6° beperkt. De temperatuurcoëfficiënten a_1 en a_2 bedragen ca $5 \cdot 10^{-5}$, zoodat de eerste term van (3)

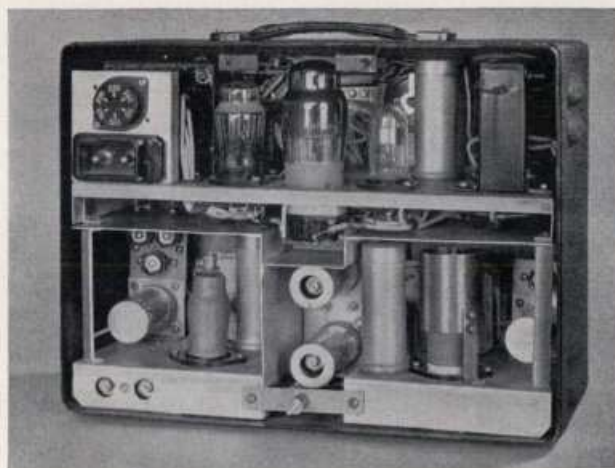


Fig. 5. Plaatsing der onderdelen in de toengenerator GM 2307; in het bovenste compartiment het voedingsgedeelte en de versterker, rechts en links in het onderste gedeelte de spoelen en condensatoren der oscillatoren.

een verlopen van $f \cdot 3 \cdot 10^{-4}$ veroorzaakt, d.i. bij de hoogste frequenties ongeveer 5 per/sec. Aangezien de nauwkeurigheid, waarmee de frequentieschalen geijkt en afgelezen kunnen worden, ook beperkt is en in ons geval bij de hoogste frequenties een fout van bijv. 100 per/sec kan meebrengen (relatieve nauwkeurigheid ca 1%), zou het weinig zin hebben om het genoemde verlopen nog sterker te willen reduceeren.

Belangrijker is de tweede term van verg. (3). Deze drukt een absolute frequentievariatie uit, die onafhankelijk is van de ingestelde frequentie f . Tengevolge van de groote waarde van f_1 (100 000 per/sec) is de tweede term zelfs bij de hoogste toonfrequenties f nog in grootte vergelijkbaar met de eerste term, en bij de lage frequenties speelt alleen de tweede term een rol. Om deze term voldoende klein te houden, ziet men in de eerste plaats, dat f_1 niet willekeurig hoog gekozen mag worden, zooals in het begin reeds werd vermeld. Verder zal men trachten, Δt en Δa zoo klein mogelijk te maken, dwz. de beide oscillatoren zooveel mogelijk op gelijke wijze te doen verlopen. Door de symmetrische plaatsing in de kast (zie fig. 5) is inderdaad Δt heel klein gemaakt⁵⁾. Op deze wijze is tenslotte bereikt, dat de frequentie in het eerste kwartier na het inschakelen niet meer dan 9 per/sec verloopt, zie fig. 6; in het daaropvolgende uur verloopt zij nog ca 8 per/sec, en in de eindtoestand, die na eenige uren wordt bereikt, is de totale frequentievariatie ongeveer 20 per/sec.

⁵⁾ Het is ook mogelijk om Δt en Δa verschillend teken te geven en daardoor de tweede term voor een bepaalde temperatuurverhoging geheel te doen verdwijnen. Voor het overige temperatuurgebied blijft dan echter de wenschelijkheid bestaan om Δt en Δa klein te maken.

Om niettegenstaande het verlopen (en eventuele frequentievariaties bij schommelingen van de omgevingstemperatuur) de ijking der frequentieschalen steeds in overeenstemming te kunnen brengen met de werkelijk verkregen frequenties, is parallel met de draaicondensator van de oscillator G_2 nog een kleine vaste condensator met een regelbare weerstand R in serie geschakeld, zie fig. 3. Door variëren van R laat men de kleine condensator in meerdere of mindere mate bijdragen tot de totale capaciteit en beïnvloedt men dus de frequentie f_2 een weinig. Zet men beide draaicondensatoren op de stand nul van hun frequentieschaal, dan kan men door deze fijne regeling er voor zorgen, dat hier inderdaad $f_2 = f_1$, dus exact $f = 0$ wordt.

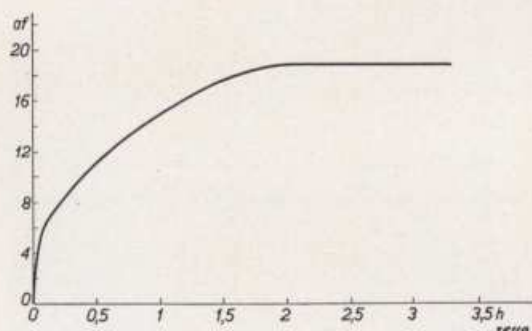


Fig. 6. Het verlopen van de frequentie van de toengenerator tijdens het opwarmen. Uitgezet is df in per/sec als functie van de tijd na het inschakelen.

De gelijkheid van f_2 en f_1 wordt geconstateerd door middel van een kathodestraal-indicatie, die op dezelfde wijze werkt als de optische afstemindicatie bij radio-ontvangtoestellen. De eerste trap van de versterker bestaat uit een versterkerbuis EFM 1. Deze buis bevat behalve het electrodensysteem van een normale penthode nog een fluorescentiescherm Fl (zie fig. 7), waarop een gedeelte van de door de kathode geëmitteerde elektronenstroom terechtkomt. In de baan van deze elektronen bevindt zich een met het schermrooster verbonden electrode P , welke een „schaduw” op het fluorescentiescherm werpt, waarvan de grootte afhangt van de schermroosterpotentialiaal. Deze wordt beïnvloedt.

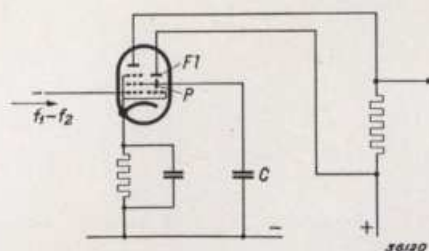


Fig. 7. Schakeling van de laagfrequentie-penthode EFM 1, die tevens ingericht is als kathodestraal-indicator. Hiermee wordt het nulpunt der frequentieschaal gecontroleerd.

vloed door de wisselspanning op het stuurrooster van de buis; bij voldoende lage frequenties van de stuurroosterspanning, dwz. wanneer we f_2 op enkele per/sec na gelijk aan f_1 hebben gemaakt, ziet men derhalve de schaduw op het fluorescentieschermje periodiek groter en kleiner worden. Men regelt nu de weerstand R zoodanig, dat het flikkeren steeds langzamer wordt en de schaduw tenslotte stilstaat, waarmee een scherp criterium voor de gelijkheid van f_2 en f_1 verkregen is.

Bij hogere frequenties (>30 per/sec) mag de schermroosterpotentialaal natuurlijk niet meer met de stuurroosterspanning op en neer gaan, aangezien bij die frequenties de buis normaal als versterker moet werken. Hiervoor is tusschen schermrooster en kathode een condensator aangebracht, die voor de genoemde frequenties practisch een kortsluiting vormt, zoodat de schermroosterpotentiala constant blijft.

Het verloop van de amplitude der uitgangsspanning

Voor het opnemen van frequentiekaracteristieken is het gewenscht, dat het door de toongenerator geleverde signaal niet alleen in frequentie maar ook in grootte constant blijft. De grootte van het signaal wordt echter bepaald door de diverse plaatspanningen, die tengevolge van schommelingen der voedende netspanning aanzienlijk kunnen variëren. Ook de temperatuurvariaties tijdens het opwarmen enz. kunnen zich in dit opzicht hinderlijk doen gevoelen, aangezien hierdoor de weerstand der wikkelingen van de voedingstransformator, dus ook de plaatspanning, verandert. Om nu de invloed van plaatspanningsvariaties op het afgegeven vermogen van de toongenerator zooveel mogelijk te beperken, hebben we een compensatieschakeling toegepast, waarvan het principe in fig. 8 is weergegeven. De uit het voedingsapparaat verkregen gelijkspanning E voedt een neonbuis L en een belastingsweerstand R_b , die door de mengbuis en de twee versterkerbuizen van de toongenerator wordt gevormd. De

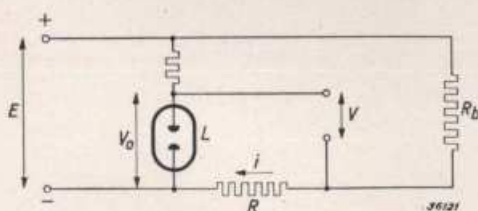


Fig. 8. Compensatieschakeling voor het verkrijgen van een constante uitgangsspanning van de toongenerator. E gelijkspanning, geleverd door het voedingsapparaat. R_b belastingsweerstand (mengbuis + twee versterkerbuizen). L neonlampje, V plaatspanning voor de buis in de oscillator G_1 (fig. 3).

in de figuur aangegeven spanning V dient ter voeding van de buis in de generator G_1 (zie fig. 3). Men ziet, dat $V = V_0 - iR$, waarbij V_0 de spanning op de neonbuis is en i in hoofdzaak de stroom door de belastingsweerstand R_b . Wanneer nu E stijgt, zal i toenemen met het bedrag Δi , V_0 echter blijft nagenoeg constant, neemt bijv. met het zeer kleine bedrag ΔV_0 toe. Dus varieert V met

$$\Delta V = \Delta V_0 - R \cdot \Delta i.$$

Door R doelmatig te kiezen, kan men ΔV min of meer negatief maken. Terwijl dus bij een toename van E de anodespanning der drie door R_b aangeduide buizen stijgt, daalt dan die van de eerste buis, en het is duidelijk, dat men deze twee effecten door geschikte keuze van R elkaar juist kan laten compenseeren, zoodat de uitgangsspanning van de toongenerator in eerste benadering onafhankelijk wordt van de spanning E , dus onafhankelijk van de netspanning en de temperatuur. Het op deze wijze verkregen resultaat is weergegeven in fig. 9. Men ziet, dat bij netspanningsschommelingen van 10% het signaal van de toongenerator slechts ca 1% in sterkte varieert.

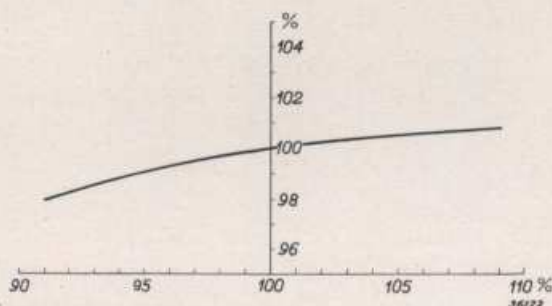


Fig. 9. Verloop van de uitgangsspanning van de toongenerator (verticale as) bij variaties van de netspanning (horizontale as).

Het gebruik van de toongenerator

De spanningen, die men noodig heeft als ingangsspanning voor het onderzoek van verschillende versterkers, kunnen zeer uiteenloopen. In de toongenerator wordt derhalve de gefilterde uitgangsspanning van de mengbuis via een potentiometer aan de versterker toegevoerd (fig. 10). Met deze potentiometer, die dank zij de vlakke frequentiekaracteristiek en de geringe invloed van netspanningsvariaties enz. rechtstreeks in volt kon worden geijkt, kan men de door de toongenerator geleverde uitgangsspanning op de gewenschte waarde instellen. De ijking geldt voor aanpassing op een belastingsimpedantie van 1000 ohm, de maximale spanning is hierbij normaal 15 V. Om bij het onderzoek van luidsprekers, kabels enz. de toongenerator ongeveer te kunnen aanpassen bij het te onder-

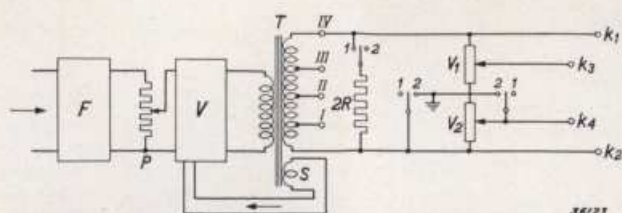


Fig. 10. Schakeling van de output van de toongenerator. Met de aftakkingen I-IV van de outputtransformator T kan de toongenerator aangepast worden bij belastingsimpedanties van 1000, 500, 250 en 5 ohm. S is de wikkling voor de tegenkoppeling. Met de potentiometer P , die voor de aftakking IV rechtstreeks in volt is geijkt, wordt de signaalsterkte geregeld. Op aftakking IV kan een verzwakker V_1 , V_2 worden aangesloten (dit geval is in de figuur weergegeven). In stand I van de drie schakelaars (zij worden door één knop bediend) staan de twee gelijke verzwakkers V_1 en V_2 in serie en men verkrijgt tussen de klemmen k_3 en k_4 een gebalanceerde, in stappen van 10 db regelbare, spanning. Bij stand 2 van de schakelaars is V_2 afgeschakeld en k_4 geaard, men heeft dan een ongebalanceerde spanning. Doordat in stand 1 de weerstand $2R$ (R = weerstand van één verzwakker) parallel aan $V_1 + V_2$ wordt geschakeld, is de outputtransformator in beide standen met dezelfde weerstand (R) belast, zoodat de spanning, die men tussen k_1 en k_2 kan meten, precies dezelfde blijft.

zoeken object, is de outputtransformator van aftakkingen voorzien, bestemd voor belastingsimpedanties van resp. 1000, 500, 250 en 5 ohm. De transformator is zoodanig geconstrueerd, dat ook bij gebruik van de aftakkingen de frequentie-karakteristiek van de toongenerator vrijwel vlak blijft. Verder kan men door een eenvoudige omschakeling een verzwakker op de outputtransformator aansluiten, waarmee het signaal in stappen van 10 db kan worden verzwakt. De verzwakker is zoo gebouwd, dat zoowel een gebalanceerde spanning verkregen kan worden, die noodig is bijv. voor het onderzoek van balansversterkers, alsook een ongebalanceerde, éézijdig geaarde spanning. Dit is in het onderschrift van fig. 10 toegelicht. In fig. 11 is een foto van de toongenerator weer-

gegeven, waarop de verschillende knoppen voor het bedienen van de potentiometer, de verzwakker, enz. zijn te onderscheiden.

Heeft men grotere spanningen dan 15 volt noodig, zooals bijv. voor het meten van de vervorming van groote versterkerbuizen bij volle uitsturing, of ook voor het onderzoek van zendbuizen, die als modulator worden gebruikt, dan kan men de spanning aan de primaire wikkling van de outputtransformator afnemen. Men heeft dan ongeveer 50 V ter beschikking. Door op de reeds beschreven wijze (met de condensator C_1 , zie fig. 3) het vermogen van de toongenerator nog op te voeren ten koste van een wat grotere vervorming, kan men hier zelfs een spanning van 125 V verkrijgen.



Fig. 11. De toongenerator GM 2307. Op de frontplaat onderscheidt men onderaan de knoppen der draaicondensatoren met de beide, van 0 tot 1000 resp. van 0 tot 15 000 loopende frequentieschalen. Daarboven in het midden de kathodestraal-indicator, rechts en links de knoppen van potentiometer en verzwakker, enz.

SUBJECTIEVE FOTOMETRIE

door J. VOOGD.

535.24

Hoewel het tegenwoordig mogelijk is om de metingen van de lichttechniek langs objectieve weg uit te voeren, is de subjectieve fotometrie in de praktijk nog steeds van groote betekenis. In dit artikel wordt aan de hand van onderzoeken, die in dit laboratorium zijn verricht, nagegaan, welke subjectieve meetmethode bij het meten van gasontladingslampen de grootste waarborg biedt voor het verkrijgen van juiste resultaten. Aanbevolen wordt de toepassing van de filtermethode met flikkerfotometer en berekende filterdoorlating. Het filter moet zoodanig gekozen worden, dat de spectrale samenstelling (niet de kleur!) van het gefilterde licht van de vergelijkingslamp zoo goed mogelijk overeenstemt met die van de te meten lamp, terwijl als waarnemers aan de flikkerfotometer een zoodanige groep wordt gekozen, dat de gemiddelde ooggevoeligheidskromme goed aangepast is bij de internationale ooggevoeligheidskromme (geel : blauw-verhouding 0,985).

Door de ontwikkeling der gasontladingslampen is de belangstelling voor de fotometrie in sterke mate toegenomen¹⁾. Het bleek namelijk, dat de meetresultaten, die bij het visueel fotometreeren van deze gekleurde lichtbronnen werden verkregen, afhankelijk waren van de gebruikte meetmethode. Dit feit gaf aan de eene kant aanleiding om de grondslagen van de visuele fotometrie opnieuw te onderzoeken, terwijl aan de andere kant getracht werd om naast de visuele methoden voor het bepalen van de lichtstroom of de lichtsterkte van een lamp ook objectieve methoden uit te werken.

In een vorig artikel in dit tijdschrift²⁾ hebben wij een nauwkeurige objectieve fotometer beschreven, die in dit laboratorium is gebouwd en die sedertdien in het gebruik volkomen betrouwbaar is gebleken. Tot het toepassen van een nauwkeurige objectieve fotometer is men echter in vele laboratoria nog niet overgegaan. De vraagstukken van de visuele of subjectieve fotometrie hebben derhalve naast theoretische ook praktische beteekenis behouden.

In dit artikel zal de vraag worden behandeld, welke visuele meetmethode de grootste waarborg biedt voor het verkrijgen van juiste resultaten. Daarbij zal gebruik worden gemaakt van gegevens, welke in dit laboratorium in de loop der laatste jaren zijn verkregen.

De grondslagen der subjectieve fotometrie van gekleurde lichtbronnen (heterochrome fotometrie) zijn ongeveer 30 jaren geleden gelegd, vooral door het werk van den Amerikaanschen onderzoeker Ives. Deze heeft opgemerkt, dat men aan een bruikbaar systeem voor heterochrome fotometrie de eisch moet stellen, dat voldaan is aan de volgende wetten:

1) de transitieve wet:

Is $a = b$ en $b = c$, dan is ook $a = c$;

2) de additieve wet:

Is $a = b$, dan is ook $a + c = b + c$.

Uit de onderzoeken, door Ives in het beginstadium van de heterochrome fotometrie gedaan, volgt, dat de meetresultaten van iederen individueelen waarnemer aan beide wetten voldoen, wanneer onder bepaalde fotometrische condities is gewerkt. Deze welbekende condities van Ives luiden:

1) Het fotometerveld moet onder een gezichtshoek van 2° worden gezien.

2) De helderheid van het fotometerveld moet ongeveer $8 \cdot 10^{-4}$ stilb bedragen.

Houdt men zich aan deze voorwaarden, dan doet het er volgens Ives voor het resultaat niet toe, of gewerkt wordt met een fotometer met instelling op gelijke helderheid of met een flikkerfotometer.

Dank zij de geldigheid van de additieve wet onder bovengenoemde condities levert elk golflengte-interval in het spectrum van de uitgezonden straling een bijdrage tot de totale helderheid, die evenredig is met de intensiteit van de straling in dat golflengte-interval en met een factor, die van de golflengte afhangt en die de relatieve ooggevoeligheid wordt genoemd. Verschillende onderzoekers hebben voor een aantal waarnemers de ooggevoeligheid als functie van de golflengte bepaald. Aan de hand van de aldus verzamelde individuele ooggevoeligheidskrommen, die onderling vrij sterk uiteenlopen, werd in 1924 getracht, een kromme vast te stellen, die als gemiddelde menselijke ooggevoeligheidskromme zou kunnen worden beschouwd. Deze kromme, bekend als de internationale ooggevoeligheidskromme, heeft sedertdien voor de heterochrome fotometrie fundamentele beteekenis gekregen.

Door het baseeren van de heterochrome fotometrie op de internationale ooggevoeligheidskromme

¹⁾ De fotometrie van metaaldamplampen, Philips techn. T. 1, 120, 1936; De nieuwe eenheid der lichtsterkte, Philips techn. T. 5, 1, 1940.

²⁾ Objectieve fotometrie, Philips techn. T. 4, 272, 1939.

en mede door het aanvaarden van de nieuwe licht-eenheid zijn de fotometrische eenheden fysisch gedefinieerd: Om de lichtsterkte K van een lichtbron te meten, moet men bepalen de verhouding:

$$K = \frac{\int E_1(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int E_2(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot \dots \cdot (1)$$

Hierin is $E_1(\lambda)$ de spectrale intensiteit van de te meten lichtbron, $E_2(\lambda)$ die van de als eenheid ingevoerde lichtbron bij de golflengte λ , en $V(\lambda)$ de internationale ooggevoeligheid bij de golflengte λ . De integraties moeten over het geheele zichtbare spectraalgebied worden uitgestrekt.

De tegenwoordige onderzoeken op het gebied van de praktische visuele fotometrie hebben nu ten doel, een methode te vinden, welke uitkomsten levert, die in overeenstemming zijn met deze fysische definitie. De moeilijkheden, die men daarbij ondervindt, worden veroorzaakt door het feit, dat men in het licht van latere ervaringen in twijfel moet trekken of de grondslagen van de subjectieve fotometrie, zooals deze door Ives zijn ontwikkeld, met voldoende nauwkeurigheid geldig zijn.

Eenige proefnemingen

Wanneer bij het fotometreeren voldaan is aan de condities van Ives, zou het meetresultaat voor één waarnemer bij gebruik van een flikkerfotometer hetzelfde moeten zijn als bij gebruik van een fotometer met instelling op gelijke helderheid. Dit werd voor enkele gevallen nauwkeurig op de proef gesteld.

De lichtsterkte van een gasontladingslamp werd vergeleken met die van een standaardlamp, waarvan het licht een filter had doorlopen. Dit filter was zoodanig gekozen, dat de kleur van de vergelijkingslamp, door het filter bekeken, zeer goed aangepast was bij die van de gasontladingslamp. Bij het instellen op gelijke helderheid werd dan ook de meetnauwkeurigheid niet storend beïnvloed door de aanwezigheid van een te groot kleurverschil in het fotometerveld.

Als gasontladingslampen werden een kwikdamp-lamp (HO 1000) en een natriumlamp (SO 400) gebruikt. Bovendien werd met de kwikdamp-lamp gemeten, terwijl deze voorzien was van een filter, dat alleen de sterke groene lijn doorlaat. Voor elk van deze drie gevallen werd bij de standaardlamp een geschikt kleuraanpassend filter gevonden.

De vergelijking van de lichtsterkte van de gasontladingslamp met die van de combinatie van vergelijkingslamp en kleuraanpassend filter werd met verschillende fotometers uitgevoerd. Ten eerste gebruikten wij de Lummer-Brodhun-fotometer,

waaruit de contrastplaatjes waren verwijderd. Het gezichtsveld van deze fotometer is in fig. 1a weergegeven. Verder werd gemeten met de Bechstein-fotometer met instelling op gelijke helderheid (eveneens zonder contrastplaatjes), waarvan het gezichtsveld in fig. 1b is weergegeven. Tenslotte werd ook met een flikkerfotometer gemeten. Bij alle metingen voldeden grootte en helderheid van het gezichtsveld aan de condities van Ives.

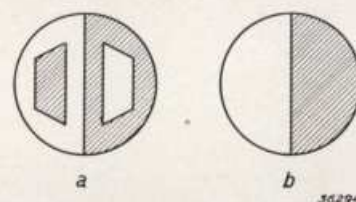


Fig. 1. a) Het gezichtsveld van een fotometer volgens Lummer en Brodhun.
b) Het gezichtsveld van een gelijkheidsfotometer volgens Bechstein.
Het gearceerde en het niet gearceerde gedeelte moeten op gelijke helderheid worden ingesteld.

Uit de metingen voor één gasontladingslamp, verricht door één waarnemer, kregen wij met behulp van de drie fotometers drie waarden voor de kaarssterkte: K_{LB} , K_B en K_f . Deze drie waarden zouden, afgezien van een kleine speling door toevallige meetfouten, gelijk moeten zijn. Om aan te geven, in hoeverre dit het geval is, maakten wij gebruik van de verhoudingen K_{LB}/K_f en K_B/K_f . In tabel 1 zijn deze verhoudingen voor elke gasontladingslamp opgegeven, zooals deze door verschillende waarnemers werden bepaald.

Tabel 1

Waarnemer	Lichtbron					
	Kwiklamp		Kwiklamp, gezien door groen filter		Natriumlamp	
	K_{LB}/K_f	K_B/K_f	K_{LB}/K_f	K_B/K_f	K_{LB}/K_f	K_B/K_f
I	1,03	1,00	1,03	0,96	0,99	1,00
II	1,08	1,03	1,03	0,94	1,00	1,01
III	1,05	1,04	1,02	0,98	0,97	1,00
IV	0,99	1,01	1,05	0,97	0,98	0,98
V	1,07	1,02	1,00	0,94	0,99	1,00
VI	1,01	0,98	0,93	0,95	0,97	0,98
VII	1,05	0,99	1,03	0,97	1,02	0,98
VIII	1,04	1,02	—	—	—	—
IX	1,02	1,02	1,06	0,98	0,96	1,02
Gemiddeld	1,04	1,01	1,02	0,96	0,98 ⁵	0,99 ⁵

Ondanks de verschillen tusschen de individuele waarnemers kan men zeggen, dat de verhoudingen K_{LB}/K_f en K_B/K_f in sommige gevallen systematisch

van de waarde 1,00 verschillen. Het gunstigst staat de zaak voor de natriumlamp, waar de resultaten voor de drie fotometers vrijwel overeenstemmen. Bij de kwiklamp wordt met de flikkerfotometer de kleinste lichtsterkte gemeten; de lichtsterkte, gemeten met de Bechstein-fotometer, stemt hiermede vrijwel overeen. Met de Lummer-Brodhun-fotometer wordt daarentegen duidelijk een grootere lichtsterkte gevonden.

Weer anders staat het bij de kwiklamp, gezien door een groen filter. Hier is de kaarssterkte volgens de flikkerfotometer 2% kleiner dan volgens de Lummer-Brodhun-fotometer en 4% groter dan volgens de Bechstein-fotometer.

Bij de beoordeling van deze verschillen kan worden opgemerkt, dat men a priori had mogen verwachten, dat tusschen de flikkerfotometer en de fotometer met instelling op gelijke helderheid verschillen in meetresultaten optreden. Immers, de criteria der instelling zijn in deze gevallen van volkomen verschillend karakter. Merkwaardig is echter, dat de beide fotometers met instelling op gelijke helderheid ook onderling systematische verschillen vertoonen. De oorzaak van deze verschillen hebben wij niet kunnen vaststellen. Vermoedelijk is hier van belang, dat de kleuraanpassing, hoe goed ook, nooit volkomen te verwezenlijken is. De invloed van het kleine resterende kleurverschil wordt nu bij instelling met de Lummer-Brodhun-fotometer anders ondervonden dan bij instelling met de Bechstein-fotometer. Bij de Bechstein-fotometer is het kleurverschil duidelijker waar te nemen en men blijft er zich van bewust, dat men verschillend gekleurde helften van het fotometerveld instelt op gelijke helderheid. Bij de Lummer-Brodhun-fotometer wordt dit kleine kleurverschil daarentegen bij de instelling op gelijke helderheid nauwelijks opgemerkt. Vermoedelijk is dit een gevolg van de sterkere onderverdeeling van het gezichtsveld van deze fotometer.

Uit de boven beschreven proeven blijkt in ieder geval, dat bij het fotometreeren onder de condities van Ives met verschillende fotometers uiteenlopende resultaten kunnen worden verkregen. Dientengevolge rijst de vraag, of de transitieve en de additieve wet geldig zijn bij het meten met elk van deze fotometers, en indien dit wel het geval is, of men voor één waarnemer niet komt tot verschillende ooggevoeligheidskrommen voor verschillende fotometers. Ook in andere laboratoria is men op dergelijke moeilijkheden gestuit. De onderzoeken op dit gebied zijn zeker nog geenszins afgesloten. Het feit echter, dat op dit gebied thans onzekerheid heerscht, maakt groote waakzaamheid

nodig bij het toepassen der visuele fotometrie ter bepaling van de fysisch gedefinieerde fotometrische grootheden.

Welke fotometrische methode biedt de grootste waarborg voor een juist en nauwkeurig resultaat?

Zoals wij in het voorgaande gezien hebben, biedt het voldoen aan de condities van Ives geen voldoende waarborg, dat de transitieve en de additieve wet gelden. Toch moet de geldigheid van deze wetten als een primaire vereischte worden beschouwd om met behulp van een fotometrische opstelling juiste resultaten te kunnen verkrijgen.

De fotometrie met instelling op gelijke helderheid heeft het groote nadeel, dat reproduceerbare metingen bij aanwezigheid van een merkbaar kleurverschil vrijwel niet mogelijk zijn. Dientengevolge is het uitermate moeilijk om de geldigheid van de transitieve en additieve wet bij het meten met een dergelijke fotometer rechtstreeks te controleren. Maar zelfs al kon men aannemen, dat de transitieve en de additieve wet geldig zijn, dan blijft nog steeds de vraag open, of de ooggevoeligheidskromme van den waarnemer voldoende overeenstemt met de internationale ooggevoeligheidskromme. Ook dit is slechts te controleren door een tijdroovend en uiteraard onnauwkeurig onderzoek.

In beide opzichten biedt de flikkerfotometer groote voordeelen. Daar men met deze fotometer ook bij aanwezigheid van groote kleurverschillen kan fotometreeren, is een rechtstreeksche controle van de transitieve en additieve wet zonder meer mogelijk; voor zoover de ervaring strekt, blijkt aan deze wetten nauwkeurig te zijn voldaan. Om dezelfde reden is het vrij gemakkelijk om zich te oriënteren omtrent het verloop van de ooggevoeligheidskromme van een waarnemer. Op deze wijze is het mogelijk, een groep waarnemers te vormen, wier gemiddelde tot op zekere hoogte met de internationale ooggevoeligheidskromme overeenstemt.

Een eenvoudige methode, die hiertoe kan dienen, is reeds door Ives en Kingsbury uitgewerkt. Ives en Kingsbury geven een methode aan om twee verschillend gekleurde lichtbronnen (een blauwe en een gele) te vervaardigen, welke voor een waarnemer met normaal verloop van de ooggevoeligheidskromme precies dezelfde lichtsterkte moeten bezitten³⁾. Laat men nu een individueelen

³⁾ De gekleurde lichtbronnen zijn samengesteld uit een kooldraadlamp en een gekleurd filter. De kooldraadlamp moet branden op een kleurtemperatuur van 2077 °K. Het gele filter bestaat uit een oplossing van 72 gram kaliumbichromaat per liter oplossing; het blauwe filter uit een oplossing van 57 gram kopersulfaat per liter oplossing. Beide filters worden gebruikt in cuvetten met een inwendige dikte van 1 cm.

waarnemer met behulp van een flikkerfotometer de verhouding van de lichtsterkten (geel:blauw) bepalen, dan zal hij in het algemeen een resultaat vinden, dat van 1,00 verschilt. Kiest men echter een aantal waarnemers zoodanig, dat de gemiddelde geel:blauw-verhouding van de geheele groep precies gelijk 1,00 is, dan kan volgens Ives en Kingsbury het gemiddelde verloop van de ooggevoeligheidskrommen van alle waarnemers als normaal worden beschouwd. Door latere metingen heeft zich dit getal nog iets gewijzigd. Om de beste aansluiting aan de internationale ooggevoeligheidskromme te verkrijgen, moet de gemiddelde geel : blauw-verhouding van de groep waarnemers niet precies gelijk 1 maar gelijk 0,985 worden gekozen ⁴⁾.

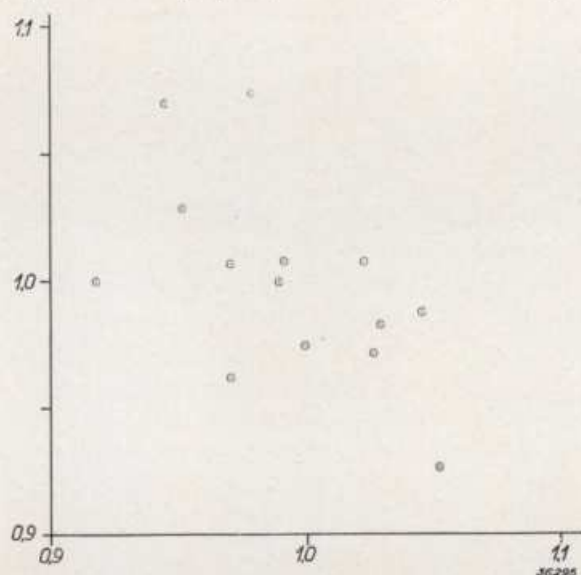


Fig. 2. Voor ieder van een aantal waarnemers is als ordinaat uitgezet de door hem gemeten verhouding tusschen de sterkten van een kwiklamp en een gasgevulde gloeilamp, terwijl als abscis de waarde van zijn „geel:blauw-verhouding” is uitgezet. De gemiddelde waarde van de ordinaat voor de geheele groep is gelijk 1,00 gesteld.

Het is nu van belang, te weten, in hoeverre door de geel:blauw-verhouding het meetresultaat van een waarnemer wordt vastgelegd. Te dien einde werd door een aantal waarnemers met bekende geel:blauw-verhouding de kaarssterkte van een kwiklamp vergeleken met die van een gasgevulde gloeilamp. Van de individuele meetresultaten voor

de kaarssterkte-verhouding werd het gemiddelde voor de groep waarnemers gevormd. De afwijking der individuele resultaten van dit gemiddelde is in fig. 2 als functie van de geel:blauw-verhouding uitgezet. De verkregen meetpunten vertoonen weliswaar een algemeene gang, maar laten zien, dat door verschillende waarnemers met eenzelfde waarde van de geel:blauw-verhouding nog vrij uiteenlopende waarden van de kaarssterkte der kwiklamp kunnen worden gemeten. Dit is toe te schrijven aan het feit, dat de ooggevoeligheidskrommen van verschillende waarnemers van betrekkelijk sterk uiteenlopende vorm kunnen zijn, zelfs wanneer de geel:blauw-verhouding dezelfde is. Zoo is het bijv. mogelijk, dat het maximum op de juiste golflengte van 5550 Å ligt, maar dat de kromme naar het rood of naar het blauw te snel of wel te langzaam afvalt. Bij het vergelijken van een gasontladinglamp met een gloeilamp, waarbij de spectrale energieverdelingen van de te vergelijken lichtkrommen sterk uiteenlopen, kunnen dergelijke verschillen van groote beteekenis zijn.

Om deze bron van onzekerheid te bestrijden, ligt het voor de hand, de spectrale energieverdeling van de vergelijkingslamp met behulp van een filter aan te passen bij die van de te meten gasontladinglamp. Zou men de spectrale verdeelingen van beide lichtbronnen volkomen gelijk kunnen maken, dan zou het er voor de fotometrische instelling niets toe doen, hoe de ooggevoeligheidskromme van den waarnemer verloopt. In de prac-

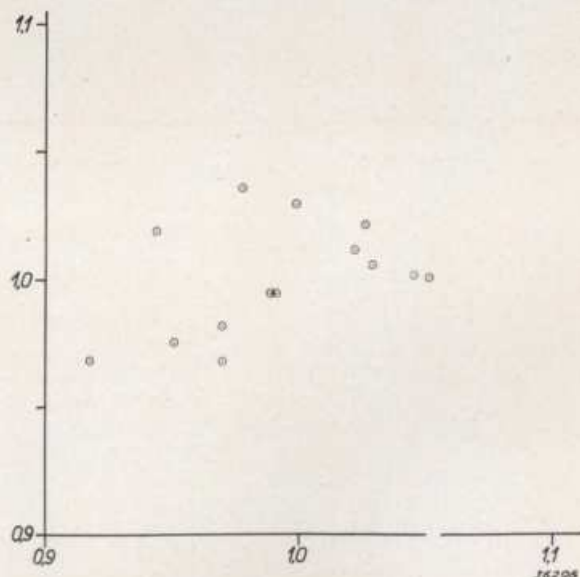


Fig. 3. Hetzelfde als fig. 2 voor het geval, dat de spectrale energieverdeling van de vergelijkingslamp aangepast is bij die van de kwiklamp met behulp van een filter, dat slechts het golflengtegebied van 5300 Å tot 5900 Å doorlaat. De door de verschillende waarnemers gemeten sterkteverhoudingen tusschen de kwiklamp en de vergelijkingslamp lopen nu veel minder uiteen.

⁴⁾ Hoe nauwkeurig de gemiddelde ooggevoeligheidskromme van een op deze wijze gevormde groep waarnemers met de internationale ooggevoeligheidskromme overeenstemt, kan thans nog niet worden beslist. Naast toevallige afwijkingen, die worden bepaald door de keuze der waarnemers, worden systematische afwijkingen niet onmogelijk geacht. Verschillende onderzoekers houden zich thans met deze vraag bezig. Van het resultaat dezer onderzoekingen zal het afhangen, of de methode van directe flikkerfotometrische vergelijking van de gasontladinglamp met de standaardlamp de mogelijkheid heeft om tot juiste resultaten te voeren.

tijk kan men met behulp van filters slechts een betrekkelijk ruwe aanpassing van de spectrale energie-verdeeling van een gloeilamp aan die van een gasontladingslamp verkrijgen. Toch blijkt, dat hierdoor het mogelijke verschil tusschen de instellingen van verschillende waarnemers met eenzelfde geel:blauw-verhouding aanzienlijk kan worden gereduceerd, zooals met ziet, wanneer men fig. 3 met fig. 2 vergelijkt. Vanzelfsprekend vermindert hierdoor ook het mogelijke verschil tusschen de gemiddelde instelling van een groep waarnemers met een gemiddelde geel:blauw-verhouding van 0,985 en de instelling volgens de internationale ooggevoeligheidskromme.

Tracht men nu deze gedachte in de practijk toe te passen, dan komt men tot de zg. filtermethode, waarbij de bepaling van de sterkte van een gasontladingslamp in twee stappen geschiedt. In de eerste stap bepaalt men de verhouding K_g/K_f tusschen de kaarssterkte van de gasontladingslamp en de kaarssterkte van de gefilterde vergelijkingslamp; in de tweede stap bepaalt men de verhouding K_f/K_o tusschen de sterkten van de gefilterde en de ongefiterde vergelijkingslamp, dus de doorlating van het filter voor het licht van de vergelijkingslamp. De gevraagde kaarssterkte van de gasontladingslamp is dan klaarblijkelijk:

$$K_g = \left(\frac{K_g}{K_f} \right) \left(\frac{K_f}{K_o} \right) K_o.$$

De eerste factor kan, zooals gezegd, met de flikkerfotometer voldoende nauwkeurig worden gemeten, indien de waarnemers zoodanig zijn gekozen, dat de gemiddelde geel:blauw-verhouding een waarde van 0,985 heeft. De tweede factor, de doorlating van het filter, zou echter op deze wijze niet voldoende nauwkeurig worden bepaald, daar de spectrale samenstelling van de gefilterde en de niet gefilterde straling der gloeilamp te sterk van elkaar verschillen. Beter is het derhalve om de doorlating van het filter langs een objectieve weg te meten. Dit kan bijv. geschieden door de spectrale doorlating van het filter te meten en hieruit met behulp van de bekende intensiteitsverdeeling van de vergelijkingslamp en van de internationale ooggevoeligheidskromme de visuele doorlating τ te berekenen. Deze bedraagt:

$$\tau = \frac{\int E(\lambda) \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) V(\lambda) d\lambda},$$

waarbij $E(\lambda) d\lambda$ de intensiteit van de vergelijkingslamp in het golflengte-interval $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ is, $\tau(\lambda)$ de spectrale doorlating en $V(\lambda)$ de relatieve

ooggevoeligheid. Beschikt men over een objectieve fotometer, dan kan men de grootheid τ natuurlijk rechtstreeks door een meting bepalen.

Wij komen dus tot de conclusie, dat voor de visuele fotometrie het meest aangewezen is de filtermethode met objectief bepaalde filterdoorlating en toepassing van een flikkerfotometer voor het vergelijken van de gasontladingslamp met het gefilterde licht van de standaardlamp. Deze meetmethode werd in dit laboratorium beproefd door haar resultaten te vergelijken met de uitkomsten, die de eerder beschreven objectieve fotometer bij dezelfde metingen leverde. Uit de resultaten kunnen wij concluderen, dat de systematische fouten van deze methode bij kwik- en natriumlampen niet groter zijn dan 1%.

Appendix

Het gebruik van de flikkerfotometer voor gasontladingslampen, brandende op wisselstroom

Tot nu toe hebben we stilzwijgend ondersteld, dat de sterkte van de te meten lampen tijdens het meten constant is. Bij gasontladingslampen is dit echter in het algemeen niet het geval; deze worden nl. meestal met wisselstroom bedreven en de lichtsterkte vertoont daarbij in eerste benadering hetzelfde verloop als de absolute waarde van de stroomsterkte. Bekijkt men de lamp of een door deze helder verlicht vlak, dan is het flikkeren nauwelijks te zien, daar het oog de snelle lichtwisselingen niet kan volgen. Meet men de lamp echter met behulp van een flikkerfotometer, dan geven deze wisselingen aanleiding tot stroboscopische effecten, die het instellen van de fotometer bemoeilijken en bovendien twijfel doen rijzen of de instelling wel juist is, dwz. de middelwaarde van de te meten lichtstroom aangeeft.

Om deze reden wordt de flikkerfotometer voor het meten van wisselstroomlampen veelal vervangen door een fotometer met instelling op gelijke helderheid, ondanks de moeilijkheden, die we hierboven hebben geschetst. Zou de aanpassing van de spectrale samenstelling van het licht van de vergelijkingslamp bij die van de te meten lamp volmaakt zijn, dan was hiertegen niets in te brengen, immers bij het meten van identieke lichtbronnen is de instelling onafhankelijk van de toegepaste fotometrische methode. In de practijk is deze aanpassing echter tengevolge van de beperkte keuze van filtertypen verre van volmaakt en hierdoor heeft het fotometreeren met gelijkheidsfotometer, afgezien van de uiteengezette onzekerheden, nog verschillende andere bezwaren.

Vooral heeft de beperkte keuze van filtertypen het gevolg, dat het gefilterde licht bij de beste spectrale aanpassing, welke men kan bereiken, nog aanzienlijk in kleur van de te meten lamp verschilt, hetgeen voor het fotometreeren met een gelijkheidsfotometer beslist ontoelaatbaar is. Dank zij het feit, dat twee lichten met gelijke kleur geenszins dezelfde spectrale samenstelling behoeven te hebben, is het dan weliswaar in vele gevallen toch mogelijk een filter te vinden, dat een practisch volmaakte kleuraanpassing levert; dit filter zal echter in het algemeen geenszins een zoo gunstig mogelijke aanpassing bij de spectrale energieverdeeling tot stand brengen.

Een voorbeeld hiervan treft men aan bij de kwiklamp. Hier-

van draagt de blauwe en violette straling vrijwel niets bij tot de lichtstroom, maar zij beïnvloedt de kleur in sterke mate. De kleuraanpassing van de vergelijkingslamp kan men het best verwezenlijken met behulp van filters, die in het rood absorberen. Het gefilterde licht bevat dan in tegenstelling tot het licht van de kwiklamp vrij veel blauw-groen. Van het standpunt van aanpassing der spectrale energieverdeling kan men beter de blauwe en violette straling van de kwiklamp verwaarloozen en een filter kiezen, dat uitsluitend een aanpassing aan de groene en gele kwiklijn geeft, door bijv. het licht tusschen 5300 Å en 5900 Å door te laten. Een dergelijk filter zou bij toepassing van een fotometer met instelling op gelijke helderheid niet bruikbaar zijn. Past men de filtermethode met een flikkerfotometer toe, dan is zoo'n filter daarentegen wel bruikbaar.

De eisch van een zeer goede kleuraanpassing voor het instellen op gelijke helderheid heeft bovendien nog een praktisch nadeel: In de praktijk komen nl. veelvuldig lampen voor, waarvan de spectrale energieverdeling betrekkelijk weinig verschilt, terwijl de kleur toch reeds duidelijk verschillend is. Voor al deze lampentypen zou men verschillende filters moeten gebruiken. Gebruikt men een flikkerfotometer, dan kan men met een veel kleiner aantal filters volstaan.

Samenvattend kunnen wij dus zeggen, dat het gebruik van een fotometer met instelling op gelijke helderheid drie

bezwaren met zich mee brengt: Ten eerste hangt het resultaat af van het toegepaste type fotometer; ten tweede is men vaak genoodzaakt de aanpassing van de spectrale energieverdeling der vergelijkingslamp bij die van de gasontladingslamp slechter te maken, dan wanneer men op de kleuraanpassing niet behoeft te letten, waardoor het resultaat sterker afhankelijk wordt van de individuele ooggevoeligheidskromme van den waarnemer; ten derde heeft men voor hetzelfde aantal typen van de te meten lampen een grooter aantal filters nodig. Tegenover deze nadeelen staat het voordeel, dat de lichtwisselingen van met wisselstroom bedreven gasontladingslampen niet storen.

Om na te gaan of dit voordeel van doorslaggevend belang is, werd de reproduceerbaarheid bij het meten van verschillende op wisselstroom brandende gasontladingslampen volgens de filtermethode naast elkaar met gelijkheidsfotometer en met flikkerfotometer onderzocht. Hierbij is gebleken, dat de instelling van de flikkerfotometer ondanks het optreden van zwevingen even goed reproduceerbaar was als die van de gelijkheidsfotometer. Bovendien kon langs andere weg worden vastgesteld, dat met de flikkerfotometer binnen de meetnauwkeurigheid inderdaad het gemiddelde over de tijd van de lichtsterkte van de lamp wordt gevonden. Wij concludeeren dus, dat de bezwaren tegen het fotometreeren van wisselstroomlampen met de flikkerfotometer ongegrond zijn.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

1500: J. A. M. van Liempt und J. A. de Vriend: Zur Klärung der Begriffe der lichttechnischen Größen bei Blitzlichtern (Physica 7, 255-264, Maart 1940).

Een overzicht wordt gegeven van de gangbare constanten voor fotoflitslampen en wel de totale flitstijd, praktische flitstijd, 50% flitstijd, mediane tijd, mediane lichtsterkte en fotografische lumen-seconde. De bestaande definities van deze begrippen worden critisch beschouwd en gedeeltelijk vervangen door nieuwe definities, welke beter zijn aangepast bij de praktijk.

1501: J. F. Schouten: The residue, a new component in subjective sound analysis (Proc. Kon. Akad. Wet. A'dam 43, 356-365, Maart 1940).

Het is sinds lang bekend, dat ons oor, indien het een reeks harmonische tonen opvangt, waarin alleen de grondtoon ontbreekt, de indruk verkrijgt, dat in het waargenomen geluid deze toch, en zelfs

vrij sterk, aanwezig is. Vroegere proeven hebben den schrijver overtuigd, dat deze „ontbrekende grondtoon" niet, zooals veelal wordt ondersteld, tengevolge van niet-lineaire vervorming in het oor wordt waargenomen. Uit de nu medegedeelde proeven, die een herhaling zijn met de optische sirene van proeven, die Seebeck voor bijna 100 jaren deed, wordt aannemelijk, dat veeleer de samenwerking van die hogere harmonischen, welke door het oor niet meer gescheiden worden waargenomen (boven de twaalfde bijv.) en die de schrijver voorstelt het „residu" te noemen, de oorzaak is van het waarnemen van de „ontbrekende grondtoon". Deze opvatting maakt een reeds door Seebeck vermoede, maar weinig duidelijk uitgesproken wijziging van de acoustische wet van Ohm noodig. Behalve, dat ze van de herhaalde fraaie proeven van Seebeck een zeer aanvaardbare verklaring geeft, blijkt de theorie van het residu ook van nut bij enkele andere acoustische vragen, op enkele waarvan de schrijver in de toekomst nader belooft in te gaan.